

1. ДИОДЫ и ДИОДНЫЕ СХЕМЫ

1.1. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода и полупроводникового диода

На рисунке 1.1 изображена вольт-амперная характеристика (ВАХ) $p-n$ -перехода: теоретическая (красная пунктирная линия) и реальная (черная сплошная линия).

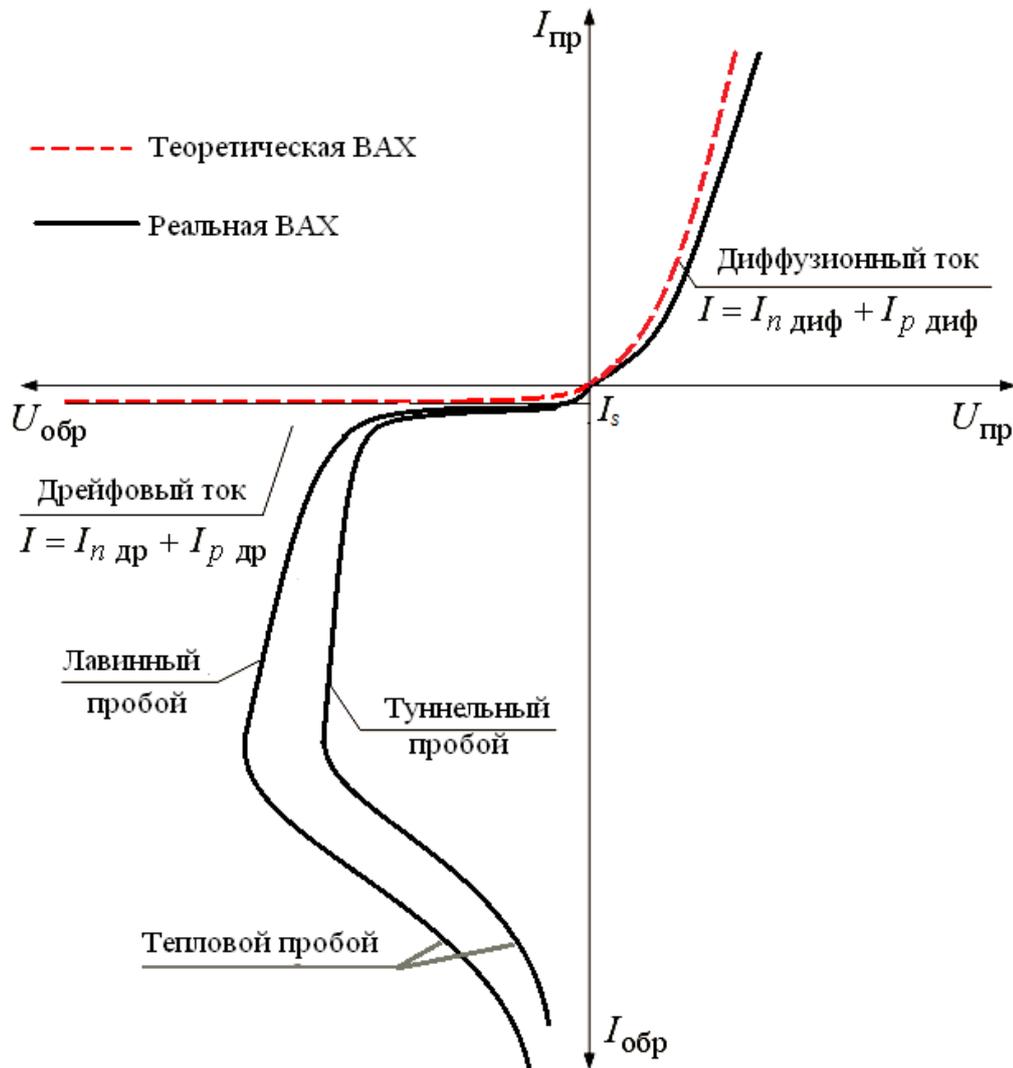


Рис. 1.1. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

ВАХ описывается уравнением:

$$I = I_s \left(e^{\frac{U - I r_0}{\varphi_T}} - 1 \right) \approx I_s \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (1.1, а)$$

или

$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right) + I r_0 \approx \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right), \quad (1.1, б)$$

где U – напряжение на p - n -переходе; I_s – обратный (тепловой) ток насыщения; T – абсолютная температура в Кельвинах; $\phi_T = \frac{kT}{e}$ – тепловой потенциал (k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона), r_0 – объемное сопротивление полупроводниковых n - и p -областей, примыкающих к p - n -переходу.

В это уравнение напряжение U подставляется со знаком «плюс» при включении p - n -перехода в прямом направлении и со знаком «минус» при обратном включении.

Именно наличие объемного сопротивления r_0 обуславливает дополнительное падение напряжения на p - n -переходе и диодах на его основе при протекании прямого тока, отчего реальная характеристика (сплошная черная линия в правой части рис. 1.1) проходит правее и с большим наклоном от вертикали в сравнении с идеальной (красный пунктир), описываемой правыми, упрощенными вариантами уравнений (1.1). Обычно это сопротивление невелико (для высоковольтных диодов не превышает несколько Ом, для маломощных низковольтных это миллиомы), поэтому в практических расчетах, особенно если ток диода невелик, таким «добавочным» падением напряжения на диоде в прямом направлении нередко пренебрегают.

Падение напряжения на диоде в прямом направлении составляет обычно 0,6 – 0,8 В для кремниевого диода, 0,3 – 0,5 В для германиевого.

При приложении обратного напряжения ток p - n -перехода стремится к значению I_s уже при напряжении в десятые доли вольта.

Обратный ток реального диода больше, чем значение I_s (см. левую часть рис. 1.1), и зависит от приложенного обратного напряжения. Это связано с тем, что помимо обратного – дрейфового тока неосновных носителей – непосредственно через (сквозь) переход, протекает также ток утечки по внешней поверхности полупроводникового кристалла. Этот ток определяется сопротивлением утечки $r_{ут}$:

$$I_{обр} = \frac{U_{обр}}{r_{ут}}. \quad (1.2)$$

$r_{ут}$ обычно составляет сотни килоом – мегаомы, что означает протекание через него тока в единицы – доли микроампер. Этот ток намного превышает величину I_s (наноамперы), т.е. в обратном направлении через диод протекает ток утечки: $I_{обр} = I_{ут} + I_s \approx I_{ут}$.

Отличие реального p - n -перехода от идеального на обратной ветви ВАХ проявляется также в наступлении пробоя при достаточно высоком обратном напряжении. Пробой проявляется как резкое возрастание обратного тока при увеличении приложенного напряжения.

Различают два основных вида пробоя p - n -перехода: электрический и тепловой. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением числа неосновных носителей заряда в переходе. Электрический пробой бывает двух видов – лавинный и туннельный. Лавинный и туннельный пробой являются

обратимыми, т.е. при снятии обратного напряжения пробой прекращается, и запирающие свойства p - n -перехода восстанавливаются. Тепловой пробой необратим – при его наступлении свойства p - n -перехода нарушаются (сам переход разрушается – расплавляется).

Лавинный пробой характерен для широких p - n -переходов, которые образуются между слабо легированными слоями с большим удельным сопротивлением. При приложении обратного напряжения создаваемое им электрическое поле складывается с полем потенциального барьера. Свободные электроны, двигаясь в сильном электрическом поле p - n -перехода, приобретают большую кинетическую энергию, и их столкновение с атомами кристаллической решетки сопровождается *ударной ионизацией* этих атомов (если энергия электрона, передаваемая при столкновении атому кристаллической решетки, больше энергии ионизации – ширины запрещенной зоны). В результате образуются электронно-дырочные пары. Новые носители также могут набрать скорость (энергию), достаточную для последующей ионизации других атомов – развивается лавинообразный процесс увеличения обратного тока.

Туннельный пробой происходит в сильнолегированных полупроводниках с «узким» p - n -переходом. В его основе лежит *туннельный эффект*: эффект проникновения электрона через потенциальный барьер без изменения своей энергии (рис. 1.2). При приложении обратного напряжения уровни на зонной диаграмме искривляются настолько, что дно зоны проводимости E_C в p -области оказывается ниже потолка валентной зоны E_V в n -области.

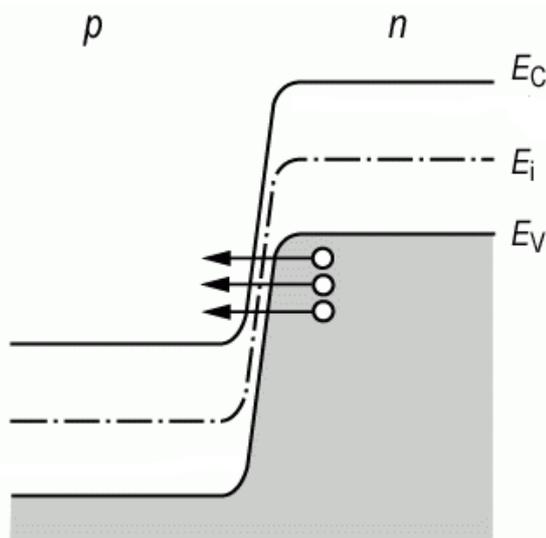


Рис. 1.2. Туннельный пробой p - n -перехода

Тепловым называется пробой p - n -перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры, характеризующийся разрушением кристалла. Тепловой пробой возникает из-за разогрева p - n -перехода большим током и обычно возникает вследствие

электрического пробоя (как это показано на рис. 1.1), если ток электрического пробоя не ограничивать на безопасном для кристалла уровне.

1.2. Электрическая емкость $p-n$ -перехода. Варикап

$P-n$ -переход обладает емкостью. Емкостные свойства связаны с наличием по обе стороны от границы электрических зарядов, созданных ионами примеси, а также подвижными носителями, находящимися вблизи границы. Емкость $p-n$ -перехода подразделяется на две составляющие: барьерную и диффузионную:

$$C_{p-n} = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}} = \begin{cases} C_{\text{бар}}, & U < 0 \text{ — обратное смещение,} \\ C_{\text{диф}}, & U > 0 \text{ — прямое смещение.} \end{cases} \quad (1.3)$$

Для обратносмещенного $p-n$ -перехода основную роль играет барьерная емкость (диффузионная емкость отсутствует), а для прямосмещенного — диффузионная емкость (она значительно больше барьерной).

Барьерная емкость отражает перераспределение носителей в $p-n$ -переходе, эта емкость обусловлена нескомпенсированным объемным зарядом, сосредоточенным по обе стороны от границы перехода.

Зависимость барьерной емкости от приложенного напряжения (рис. 1.3, б):

$$C_{\text{бар}}(U) = C_{\text{бар}}(0) n \sqrt{\frac{\Phi_k}{\Phi_k + U}}, \quad (1.4)$$

где Φ_k — контактная разность потенциалов $p-n$ -перехода; $C_{\text{бар}}(0)$ — емкость при $U = 0$ В; $n = 2$ для резких (узких) $p-n$ -переходов, $n = 3$ для плавных (широких).

Варикап — это полупроводниковый прибор на основе $p-n$ -перехода, емкость которого зависит от величины обратного напряжения (рис. 1.3). В нем используется показанная в выражении (1.4) зависимость $C_{\text{бар}}$ от обратного напряжения, поэтому в схемах варикап включают в обратном направлении.

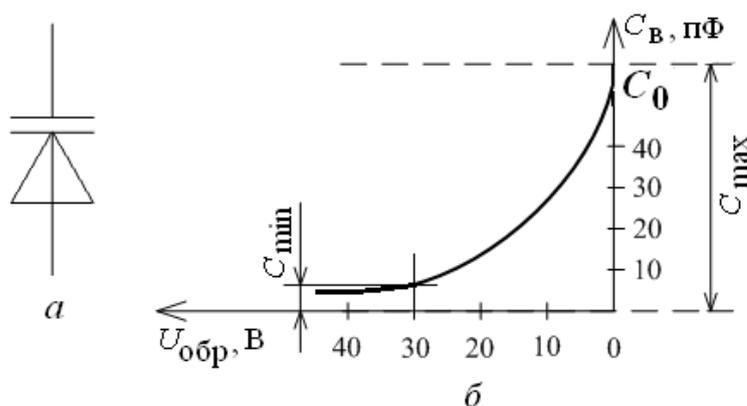


Рис. 1.3. Варикап: a — условное обозначение; b — вольт-фарадная (ВФХ) характеристика

Очевидно, что в соответствии с выражением (1.4) ВФХ имеет нелинейный характер. Рабочий участок ограничен значениями C_{\max} (при $U = 0$) и C_{\min} (когда C уже мало уменьшается).

Варикапы обычно используют для электронной перестройки резонансной частоты колебательных LC -контуров.

Диффузионная емкость характеризуется накоплением неосновных носителей зарядов вблизи p - n -перехода при протекании прямого – диффузионного тока и отражает процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных в областях.

$$C_{\text{диф}} \approx \frac{I}{\varphi_T} \tau_{\text{эфф}}, \quad (1.5)$$

где $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время жизни неосновных носителей в области p - n -перехода.

1.3. Применение диодов для выпрямления переменного тока

Основным назначением диодов является выпрямление электрического тока. Оно связано с их преимущественно односторонней проводимостью (рис. 1.1). На рис. 1.4 показан простейший выпрямитель на диоде и приведены временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие его работу.

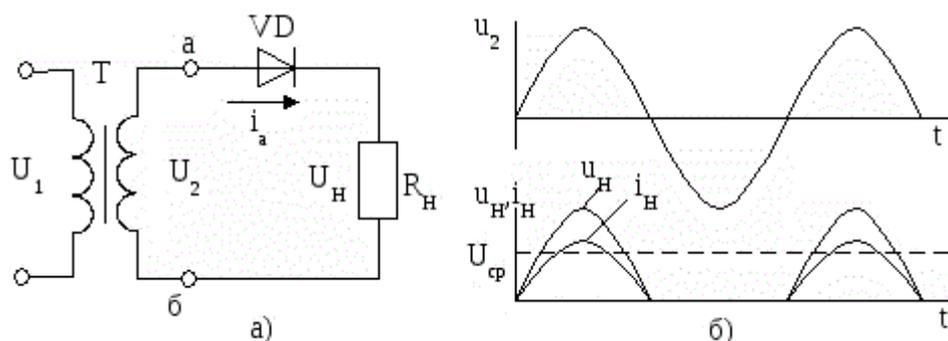


Рис. 1.4. Однополупериодный выпрямитель (а) и временные диаграммы напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 , напряжения u_H и тока i_H нагрузки (б)

Ток через диод и последовательную с ним нагрузку протекает, когда напряжение вторичной обмотки прикладывается к диоду в прямом направлении, т.е. только в течение одного полупериода, отсюда и название схемы – однополупериодный выпрямитель.

В двухполупериодном выпрямителе (рис. 1.5) благодаря использованию большего числа диодов ток в нагрузке протекает каждые полупериода. В течение первой половины периода, когда $U_2 > 0$, ток течет через VD1 и VD4, а во вторую часть периода, когда $U_2 < 0$, ток течет через VD2 и VD3.

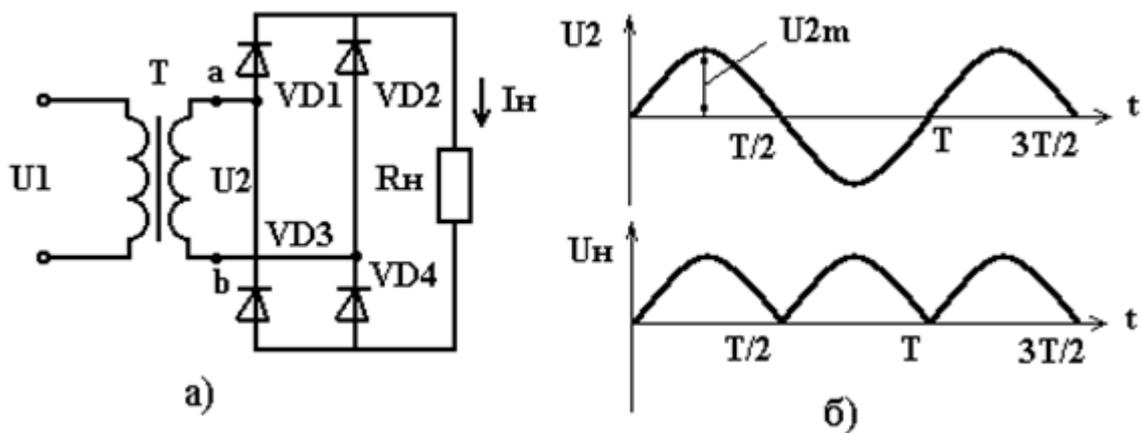


Рис. 1.5. Двухполупериодный выпрямитель (а) и временные диаграммы напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 и напряжения нагрузки u_H (б)

Как видно из рис. 1.4 и 1.5, ток и напряжение нагрузки выпрямителя имеют пульсирующий характер. Электронная аппаратура обычно требует для питания постоянное напряжение, т.е. с практически неизменной во времени амплитудой. Для этого в схемах выпрямителей применяют дополнительные сглаживающие фильтры на выходе. На рис. 1.6 показан простейший емкостной фильтр на выходе однополупериодного (а) и двухполупериодного (в) выпрямителей и соответствующие этим схемам временные диаграммы (б) и (г). Пунктиром показаны временные диаграммы U_H при отсутствии сглаживающего конденсатора.

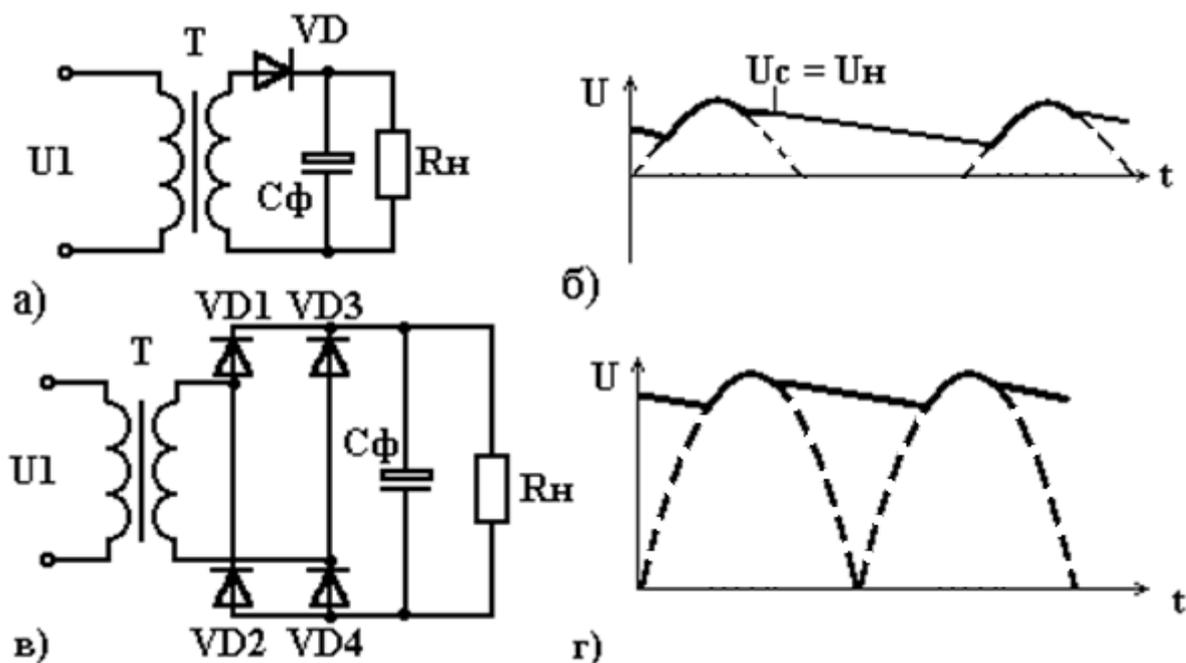


Рис. 1.6. Емкостной сглаживающий фильтр на выходе однополупериодного (а) и двухполупериодного (в) выпрямителей и соответствующие этим схемам временные диаграммы выходного напряжения (б) и (г)

Конденсатор включается параллельно нагрузке, т.е. $U_n = U_C$. Сглаживание происходит за счет инерционных свойств конденсатора, накапливающего и затем стремящегося сохранить накопленный заряд, а значит, и уровень напряжения, т.к. $Q = CU$. Заряд конденсатора расходуется на нагрузку в промежутки времени, когда амплитуда входного напряжения опускается ниже своего среднего за период значения U_{cp} (пунктирная линия на рис. 1.4, б). Соответственно, потраченный заряд восполняется от сети в моменты, когда амплитуда входного напряжения превышает его среднее значение.

Сглаживающими свойствами обладает также и катушка индуктивности (рис. 1.7). Включенная последовательно с нагрузкой, она (вследствие явления самоиндукции) препятствует быстрым изменениям тока и сглаживает, таким образом, его форму. Соответственно, сглаживается и форма напряжения нагрузки $U_n = R_n I_n$.

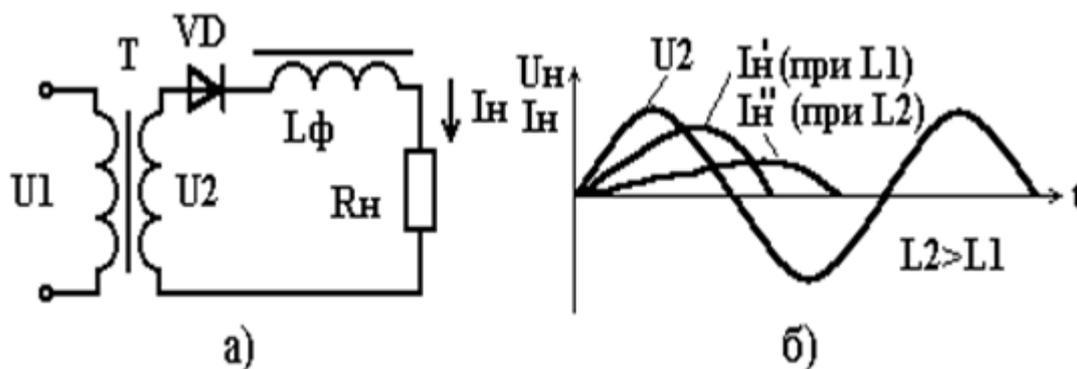


Рис. 1.7. Индуктивный сглаживающий фильтр (а) и временные диаграммы его работы (б)

Емкостной сглаживающий фильтр обычно применяют при большом сопротивлении нагрузки, а индуктивный – при малом.

На практике сглаживающие свойства конденсатора и катушки индуктивности часто объединяют, применяя LC-фильтр (рис. 1.8).

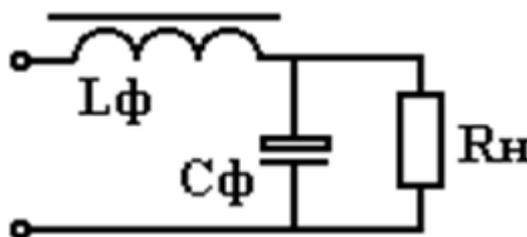


Рис. 1.8. Сглаживающий LC-фильтр

Существование описанной в параграфе 1.2 емкости $p-n$ -перехода ухудшает выпрямительные свойства диодов **на высоких частотах**. Емкость C_{p-n} с точки зрения схемы замещения диода оказывается включенной параллельно $p-n$ -переходу и, по сути, шунтирует его по переменному току. С

ростом частоты емкостное сопротивление $X_C = j \cdot 2\pi f C_{p-n}$ уменьшается, и все большая доля тока ответвляется через C_{p-n} , в обход $p-n$ -перехода, т.е. диод частично (на часть полупериода), а при более высоких частотах и полностью перестает блокировать обратный ток (рис. 1.9).

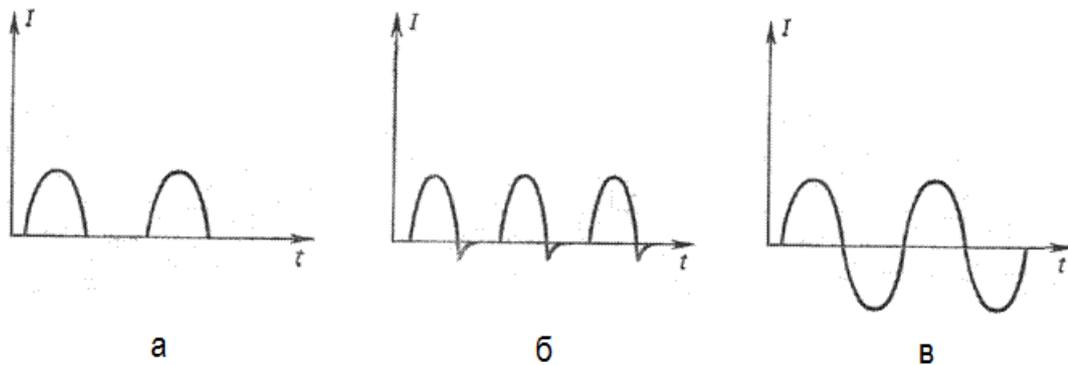


Рис. 1.9. Выпрямление синусоидального переменного тока выпрямительным диодом: а) на частоте $\omega\tau_{эфф} \ll 1$; б) на частоте $\omega\tau_{эфф} \sim 1$; в) на частоте $\omega\tau_{эфф} \gg 1$ ($\omega = 2\pi f$)

При выпрямлении прямоугольных импульсов, когда подаваемое на диод напряжение практически мгновенно меняется с прямого на обратное, диод кратковременно теряет свои выпрямительные свойства: некоторое время через него течет большой обратный ток, связанный с перезарядкой емкости C_{p-n} и ограниченный по амплитуде только величиной внешнего сопротивления (рис. 1.10):

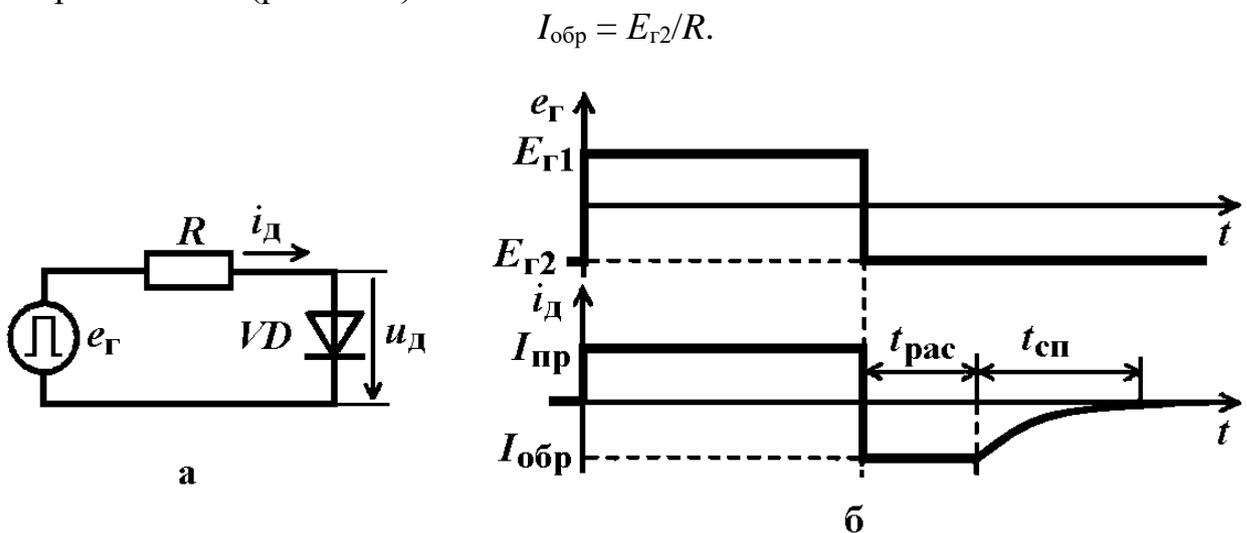


Рис. 1.10. Работа диода в импульсном режиме: а) схема; б) временные диаграммы

Длительности этапов, когда через диод протекает большой обратный ток, напрямую связаны с его диффузионной (через параметр $\tau_{эфф}$) и барьерной емкостями:

$$t_{рас} = \tau_{эфф} \ln \left(\frac{I_{пр}}{I_{обр}} + 1 \right), t_{сп} \approx 3RC_{бар} \quad (1.6)$$

Таким образом, для работы на высоких частотах и в импульсных схемах необходимо использовать специальные высокочастотные и импульсные диоды, имеющие небольшие значения емкостей p - n -перехода.

1.4. Практическое применение электрического пробоя. Стабилитроны

Как видно из рис. 1.1, наклон ветви ВАХ на участке электрического пробоя невелик, так что при изменении обратного тока в широком диапазоне напряжение на p - n -переходе изменится незначительно, т.е. останется стабильным. Это свойство полезно используется в стабилитроне – полупроводниковом диоде, который эксплуатируется в режиме электрического пробоя.

На рис. 1.11 приведена типовая схема включения стабилитрона – схема параметрического стабилизатора (а) и ВАХ стабилитрона (б). Стабилитрон включают в обратном направлении параллельно нагрузке, на которой он поддерживает стабильное напряжение, даже если $U_{вх}$ в процессе работы будет отклоняться от своего номинального значения.

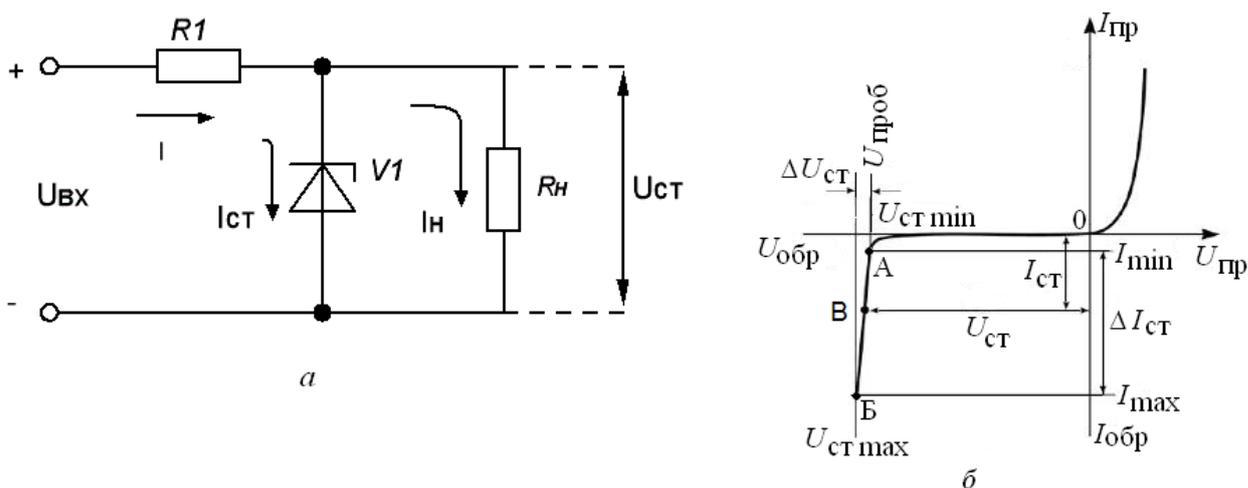


Рис. 1.11. Стабилитрон: а – типовая схема включения (параметрический стабилизатор); б – ВАХ

Как видно из рис. 1.11, а, через резистор R_1 протекает суммарный ток стабилитрона и нагрузки. Сопротивление R_1 подбирают таким образом, чтобы рабочая точка стабилитрона (его ток и напряжение) располагалась изначально в середине рабочего участка ВАХ (точка В на рис. 1.11, б, располагающаяся посередине между границами рабочего участка – точками А и Б):

$$R_1 = \frac{U_{вх.ср} - U_{ст.ср}}{I_{н.ср} + I_{ст.ср}}. \quad (1.7)$$

В формулу (1.7) подставляются средние значения токов и напряжений стабилитрона, питания и нагрузки – в процессе работы эти токи и напряжения будут отклоняться от своих средних значений. В случае, когда

увеличивается питающее напряжение $U_{вх}$, стабилитрон будет потреблять больший ток (его рабочая точка на рис. 1.11, б сместится вниз, к точке Б), так чтобы выросшее падение напряжения на R_1 скомпенсировало это увеличение входного напряжения, и U_H останется неизменным. Если $U_{вх}$ уменьшится, ток стабилитрона также уменьшится (рабочая точка сместится вверх, к положению А), падение напряжения на R_1 уменьшится, U_H останется неизменным.

Обратный ток стабилитрона не должен превысить значение $I_{ст\ max}$, иначе электрический пробой перейдет в необратимый тепловой. Это обеспечивается как раз сопротивлением R_1 : при $U_{вх\ max}$ ток стабилитрона не должен превышать значение $I_{ст\ max}$.

Непосредственно в качестве стабилизаторов напряжения в блоках питания электронной аппаратуры такие схемы на стабилитроне сейчас практически не используют, но они входят в состав этих блоков питания в качестве источников эталонного («опорного») напряжения в цепях обратной связи. Аналогичную роль они выполняют и в различных схемах сравнения и защиты в автоматике и электронной технике.

1.5. Тиристор

Тиристором называется полупроводниковый прибор, который имеет три и более $p-n$ -перехода, может длительно находиться в одном из двух состояний (открытом или закрытом) и переключаться из одного состояния в другое при соответствующих внешних воздействиях. На рис. 2 показана схема включения трехэлектродного тиристора – тринистора (а) и его выходная ВАХ (б). Как и диод, тиристор не проводит ток в обратном направлении. При этом в случае включения в прямом направлении тиристор включается (проводит ток), если подаваемое на него напряжение достигнет напряжения включения $U_{вкл}$. При этом падение напряжения на тиристоре падает до напряжения открытого состояния $U_{о.с}$, примерно равного падению напряжения на диоде в прямом направлении.

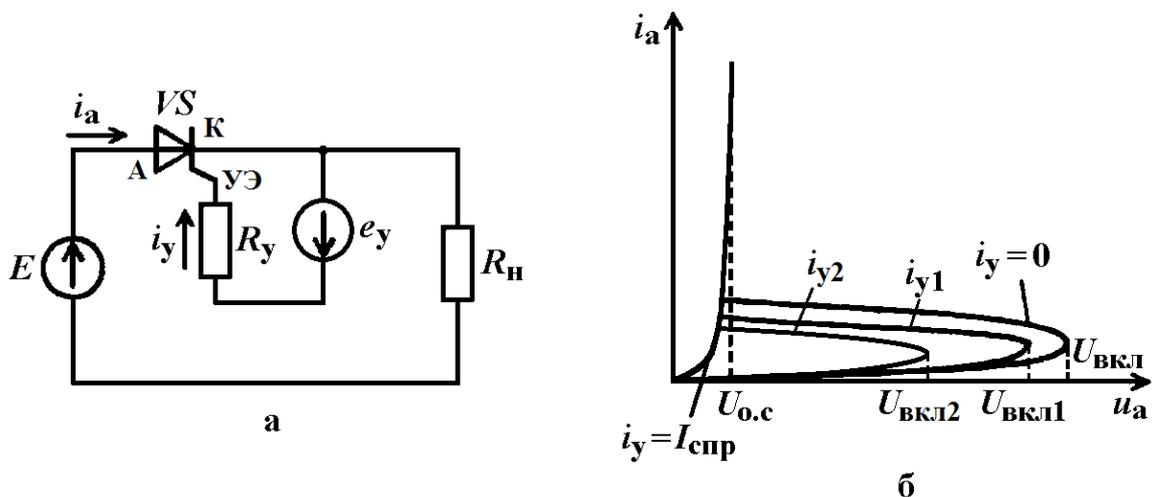


Рис. 1.12. Схема включения тиристора ключа (а) и его выходная ВАХ (б)

Напряжение включения тиристора уменьшается, если дополнительно в управляющий электрод подавать ток управления от отдельного источника. На рис. 2, б показано уменьшение напряжения включения до величин $U_{\text{вкл1}}$ и $U_{\text{вкл2}}$ при подаче токов управления, соответственно, I_{y1} и I_{y2} . Чем больше ток I_y , тем меньше напряжение включения. При подаче достаточно большого управляющего тока, называемого током спрямления $I_{\text{спр}}$, тиристор включается уже при самом малом напряжении, т.е. его ВАХ «спрямляется» до ВАХ диода.

Тиристоры используются в управляемых выпрямителях и регуляторах переменного напряжения, а также в инверторах. Во всех случаях напряжение u_a на тиристор подают меньше, чем напряжение включения при отсутствии тока управления (чтобы тиристор не включался в отсутствие тока управления), а ток управления выбирают обычно равным току спрямления. В этом случае тиристор включается в момент подачи тока управления (при любом анодном напряжении).

1.6. Управляемый выпрямитель

На рис. 1.13 приведена схема *однофазного управляемого выпрямителя* на тиристорах (а) и временные диаграммы напряжений и токов в ней. Тиристоры открываются при одновременном выполнении двух условий: к ним приложено положительное анодное напряжение, и в управляющий электрод подается ток управления i_y . Момент подачи тока управления в управляемом выпрямителе обычно сдвинут относительно момента подачи прямого напряжения на тиристор (0 и 2π для тиристорov VS1 и VS4 или π и 3π для VS2 и VS3) на так называемый **угол управления тиристора α** (рис. 1.13, б).

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя на отдельных интервалах, определяемых состояниями тиристорov.

Интервал $0 \leq \omega t < \alpha$. Напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора положительно (знак напряжения на рис. 1.13, а указан без скобок), но ток управления на управляющие электроды тиристорov не подается. Тиристоры VS1...VS4 закрыты, напряжение на нагрузке u_n равно нулю. Ток нагрузки i_n и анодные токи тиристорov $i_{a1}...i_{a4}$ равны нулю.

Интервал $\alpha \leq \omega t < \pi$. При $\omega t = \alpha$ в управляющие электроды тиристорov VS1 и VS4 подаются управляющие импульсы i_{y1} и i_{y4} , и они открываются. При этом напряжение на нагрузке становится равным напряжению на вторичной обмотке трансформатора:

Ток нагрузки протекает по цепи $+u_2 \rightarrow \text{VS1} \rightarrow R_n \rightarrow \text{VS4} \rightarrow -u_2$

Интервал $\pi \leq \omega t < \pi + \alpha$. При $\omega t = \pi$ напряжение на нагрузке становится равным нулю. Ток нагрузки i_n и токи анодов тиристорov $i_{a1}...i_{a4}$ равны нулю. Все тиристоры закрыты.

Интервал $\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi$. Напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора отрицательно (знак напряжения на рис. 1.13, а показан в скобках). При $\omega t = \pi + \alpha$ в управляющие электроды тиристорov VS2 и VS3

подаются управляющие импульсы i_{y2} и i_{y3} , и они открываются, т.к. напряжения на их анодах (относительно катодов) положительны. При этом напряжение на нагрузке становится равным напряжению на вторичной обмотке трансформатора. Ток нагрузки протекает по цепи $(+)u_2 \rightarrow VS2 \rightarrow R_H \rightarrow VS3 \rightarrow (-)u_2$ и равен $-u_2(\omega t)/R_H$.

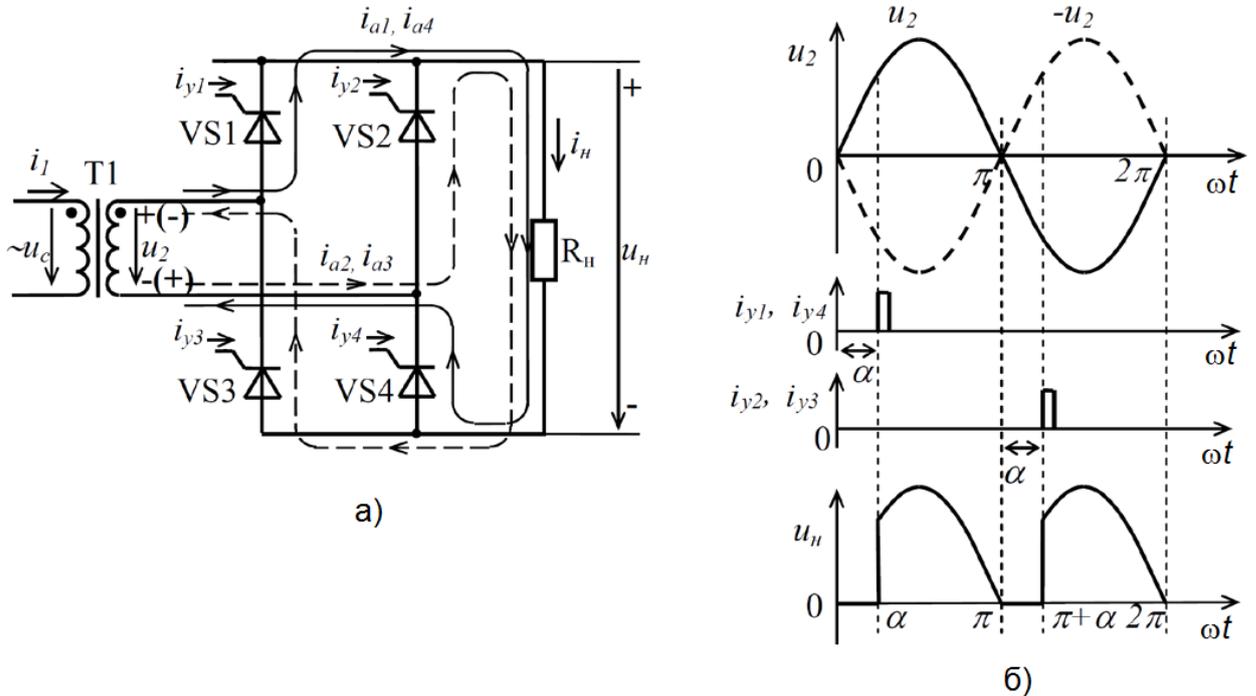


Рис. 1.13. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель (а) и временные диаграммы (б): напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 , управляющих токов тиристоров i_y и напряжения на нагрузке u_H

При $\omega t = 2\pi$ напряжение на нагрузке становится равным нулю. Тиристоры снова закрываются. Токи тиристоров и нагрузки становятся равными нулю.

В дальнейшем (при $\omega t > 2\pi$) работа выпрямителя повторяется.

На рис. 1.14 показаны временные диаграммы напряжения на нагрузке управляемого выпрямителя (рис. 1.13, а) при различных значениях угла управления тиристоров α . Видно, что изменяя угол управления α , мы регулируем среднее значение напряжения на нагрузке $U_{H,cp}$.

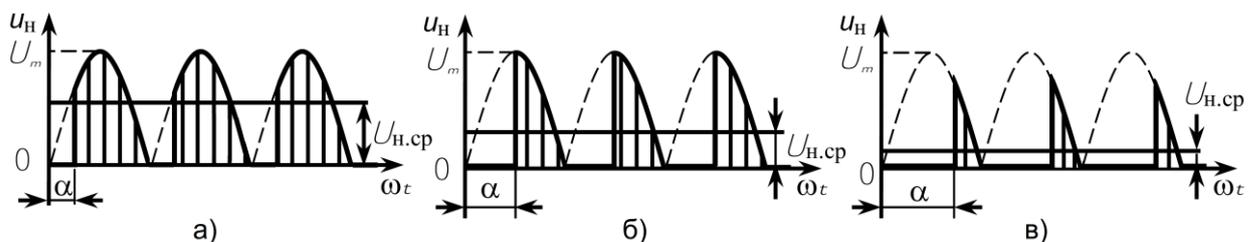


Рис. 1.14. Форма напряжения на нагрузке однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя при различных значениях угла управления тиристоров α

Среднее значение выпрямленного напряжения в зависимости от угла управления тиристором для схемы на рис. 1.13, а

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0,9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (1.8)$$

где U_2 – действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора; U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке.

1.7. Тиристорный регулятор переменного напряжения

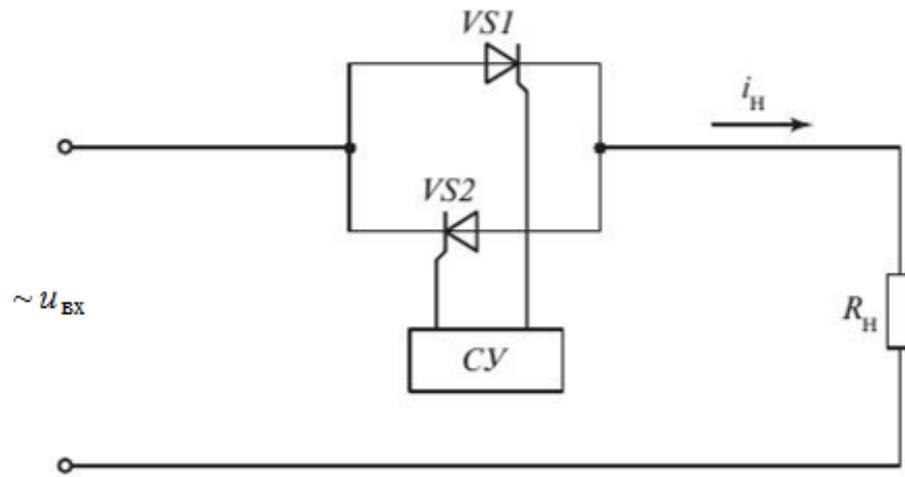
На рис. 1.15 показан регулятор переменного напряжения на двух тиристорах (тринисторах), включенных встречно-параллельно друг другу (а), и временные диаграммы напряжений и токов в схеме (б). Управление моментами включения тиристором осуществляется подачей импульсов управления i_{y1} и i_{y2} , формируемых специальной системой управления (СУ), на управляющие электроды тиристором.

При включении тиристором VS1 в момент времени $\omega t = \alpha$ входное напряжение подается на нагрузку. Ток в цепи активной нагрузки i_n повторяет форму напряжения $u_{вх}$. При спадаании его до нуля тиристор VS1 выключается. В момент времени $\omega t = \pi + \alpha$ включается тиристор VS2, и далее процессы периодически повторяются. Действующее значение выходного напряжения на нагрузке U_n будет зависеть от входного напряжения регулятора $U_{вх}$ и от угла управления тиристором α :

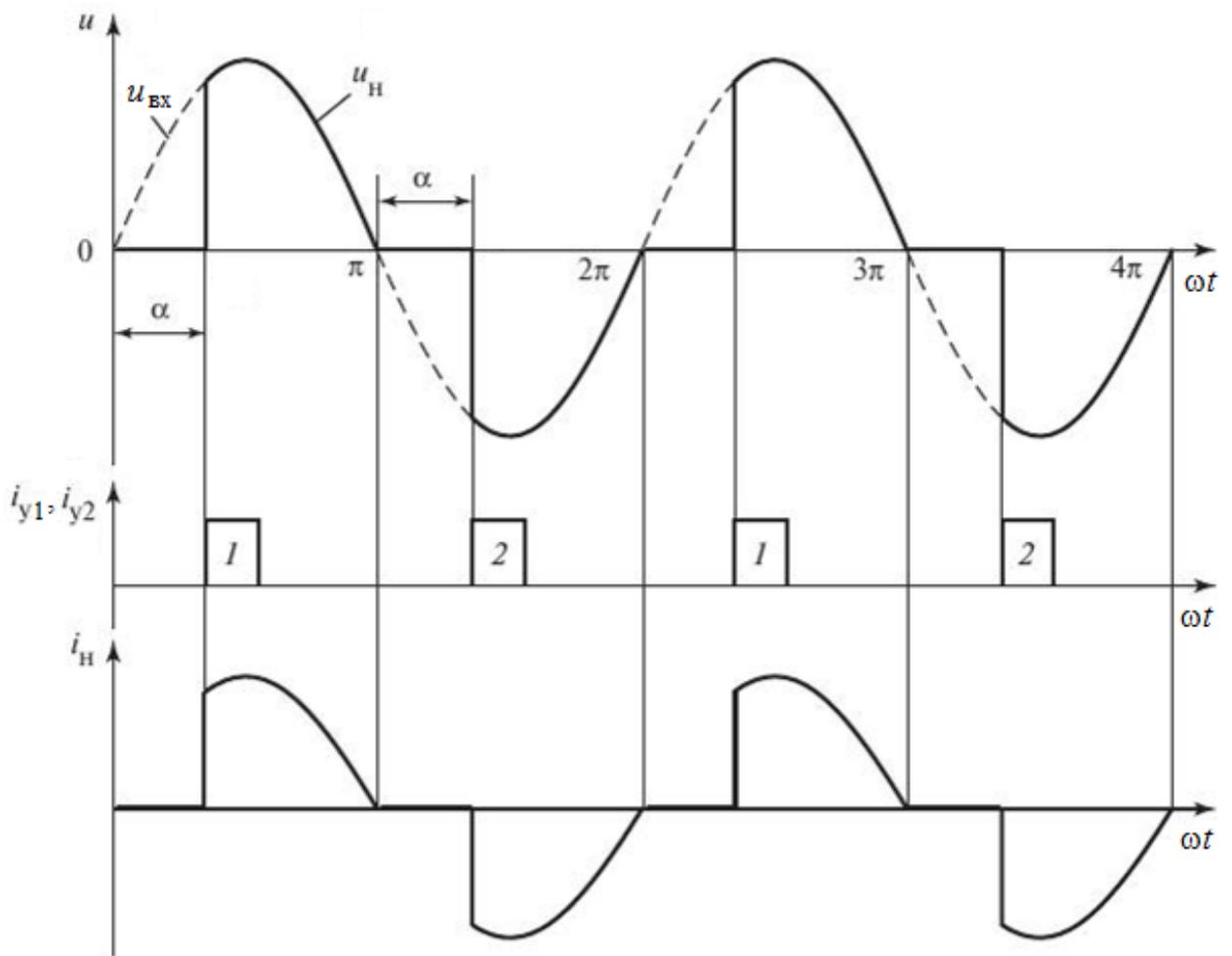
$$U_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_{вх} \sin \omega t)^2 \, d\omega t} = U_{вх} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}, \quad (1.9)$$

где $U_{вх}$ – действующее значение входного напряжения регулятора.

Изменением значения угла управления тиристором α можно регулировать действующее значение напряжения на нагрузке от максимального, равного входному напряжению (при $\alpha = 0$, когда тиристоры открываются с началом положительной полуволны прикладываемого к ним напряжения), до нуля (при $\alpha = \pi$, когда тиристоры не открываются вовсе).



а)



б)

Рис. 1.15. Тиристорный регулятор переменного напряжения (а) и временные диаграммы его напряжений и токов (б)