



Электроника

Преподаватель:
Саломатин
Александр
Федорович

Структура курса:

- 9 лекций;
- 8 Лабораторных работ;
- Расчётно-графическая работа

Форма отчетности – экзамен.

Лабораторные работы:

- Лабораторные работы проводятся в лаборатории II – 105 по половине группы.
- Первые три занятия проходят в виде практических занятий.
- Тема этих трёх практических занятий – «Проектирование источника питания для радиоэлектронной аппаратуры».
- На четвёртом занятии схема спроектированного источника питания моделируется на компьютере в программе Electronics Workbench.

- Далее проводятся последние четыре так называемые «железные» лабораторные работы (или лабораторные работы на «железе»).
- Темы последних лабораторных работ будут сообщены позднее.

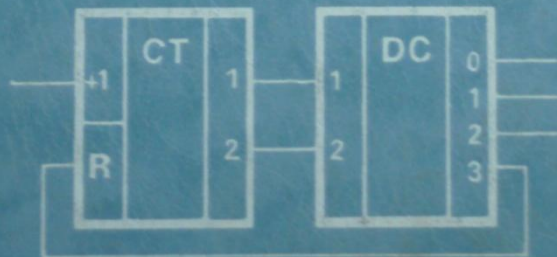
ЛИТЕРАТУРА :

ID	000119573
Расстано- вочный шифр	621.38 3-127
Автор	Забродин, Юрий Сергеевич
Заглавие	Промышленная электроника : учебник для энергетических и электромеханических специальностей вузов / Ю. С. Забродин
Выходные данные	М. : Альянс , 2008
Объем	495, [1] с. ил.
Гриф	МО

Г. Н. Горбачев
Е. Е. Чаплыгин

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Для студентов вузов



Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е.
Г 67 Промышленная электроника: Учебник для ву-
зов/Под ред. В. А. Лабунцова. — М.: Энергоатом-
издат, 1988. — 320 с.: ил.
ISBN 5-283-00517-8

Гусев В. Г. Гусев В. Г., Гусев Ю.М. Электроника и
микропроцессорная техника Издательство Высшая
школа, **2008г**



Электроника. Учебное пособие для ВУЗов
Шишкин Г.Г.Электроника. Учебное пособие для ВУЗов
Шишкин Г.Г., Шишкин А.Г.Электроника. Учебное
пособие для ВУЗов Шишкин Г.Г., Шишкин А.Г.
2009г Издательство «Дрофа»



Электроника. Полный курс лекций

Прянишников В.А.

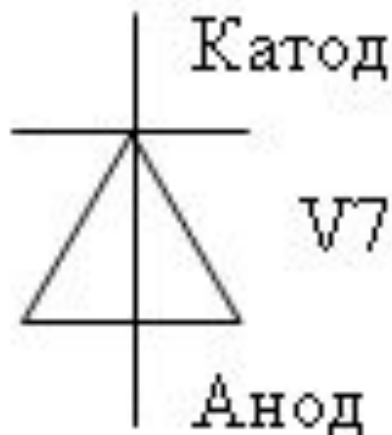
Издательство КОРОНА-Век, 2009г



Полупроводниковые диоды

Полупроводниковые диоды

Обозначение на схемах:



V или VD - обозначение диода

VS – обозначение диодной сборки

Цифра после V, показывает номер диода в схеме

Анод – это полупроводник P-типа

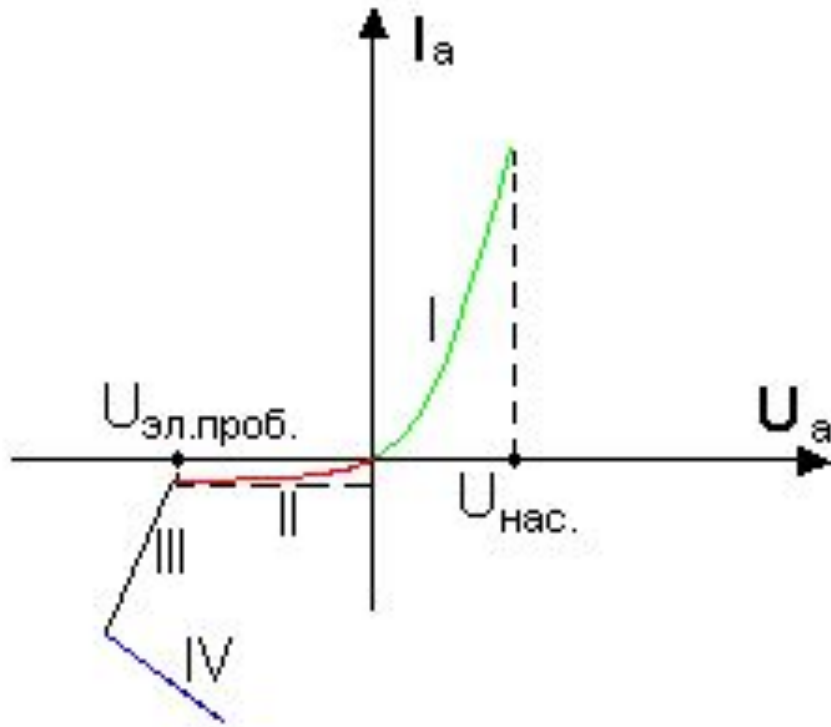
Катод – это полупроводник N-типа

- Полупроводниковый диод – это прибор с двухслойной P-N структурой и одним P-N переходом.

Слой **P** - акцепторная примесь (основные носители - дырки).
Слой **N** - донорная примесь (основные носители - электроны).

- При приложении внешнего напряжения к диоду в прямом направлении («+» на анод, а «-» на катод) уменьшается потенциальный барьер, увеличивается диффузия – диод открыт (закоротка).
- При приложении напряжения в обратном направлении увеличивается потенциальный барьер, прекращается диффузия – диод закрыт (разрыв).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода



- $U_{эл.проб.} = 10 \div$ около 6000 В – напряжение электрического пробоя. Зависит от марки диода.
- $U_{нас.} = 0,3 \div 1$ В – напряжение насыщения.
- I_a и U_a – анодный ток и напряжение

- **Участок I:**– рабочий участок (прямая ветвь ВАХ)
Участки II, III, IV, - обратная ветвь ВАХ (не рабочий участок)
- **Участок II:** Если приложить к диоду обратное напряжение – диод закрыт, но все равно через него будет протекать малый обратный ток (ток дрейфа, тепловой ток), обусловленный движением неосновных носителей.

- **Участок III:** Участок электрического пробоя. Если приложить достаточно большое напряжение, неосновные носители будут разгоняться и при соударении с узлами кристаллической решетки происходит ударная ионизация, которая в свою очередь приводит к лавинному пробояю (вследствие чего резко возрастает ток)

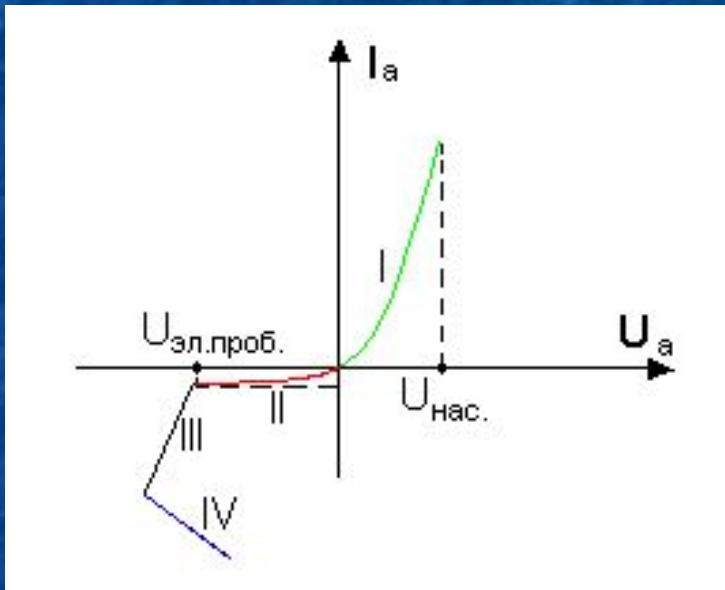
Электрический пробой, теоретически, является обратимым, после снятия напряжения P-N-переход восстанавливается.

- **Участок IV:** Участок теплового пробоя. Возрастает ток, следовательно, увеличивается мощность, что приводит к нагреву диода и он сгорает.

Тепловой пробой - необратим.

Вслед за электрическим пробоем, очень быстро следует тепловой, поэтому на практике для диодов запрещается работа при электрическом пробое.

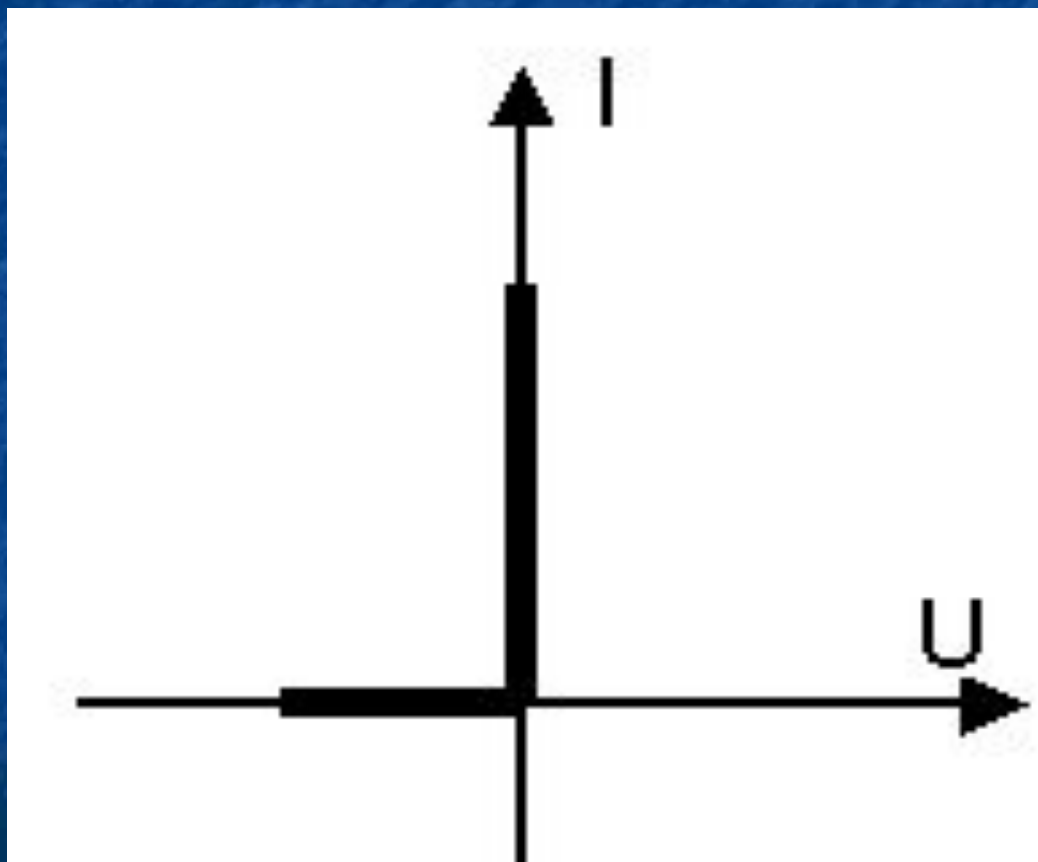
- Тепловой пробой может наступить и на рабочей ветви ВАХ (участок I).



Надо отметить, что для данной ВАХ масштабы по осям в положительном и отрицательном направлении неодинаковы.

Если сделать масштабы одинаковыми, ВАХ будет иметь следующий вид :

Вольт-амперная характеристика идеального диода (вентиля)



Основные параметры полупроводниковых диодов

■ 1. Максимально допустимый средний за период прямой ток ($I_{\text{пр. ср.}}$)

– это такой ток, который диод способен пропустить в прямом направлении не перегреваясь.

Величина допустимого среднего за период прямого тока равна 70% от тока теплового пробоя.

По прямому току диоды делятся на три группы:

1) Диоды малой мощности ($I_{\text{пр. ср.}} < 0,3 \text{ A}$)

2) Диоды средней мощности ($0,3 < I_{\text{пр. ср.}} < 10 \text{ A}$)

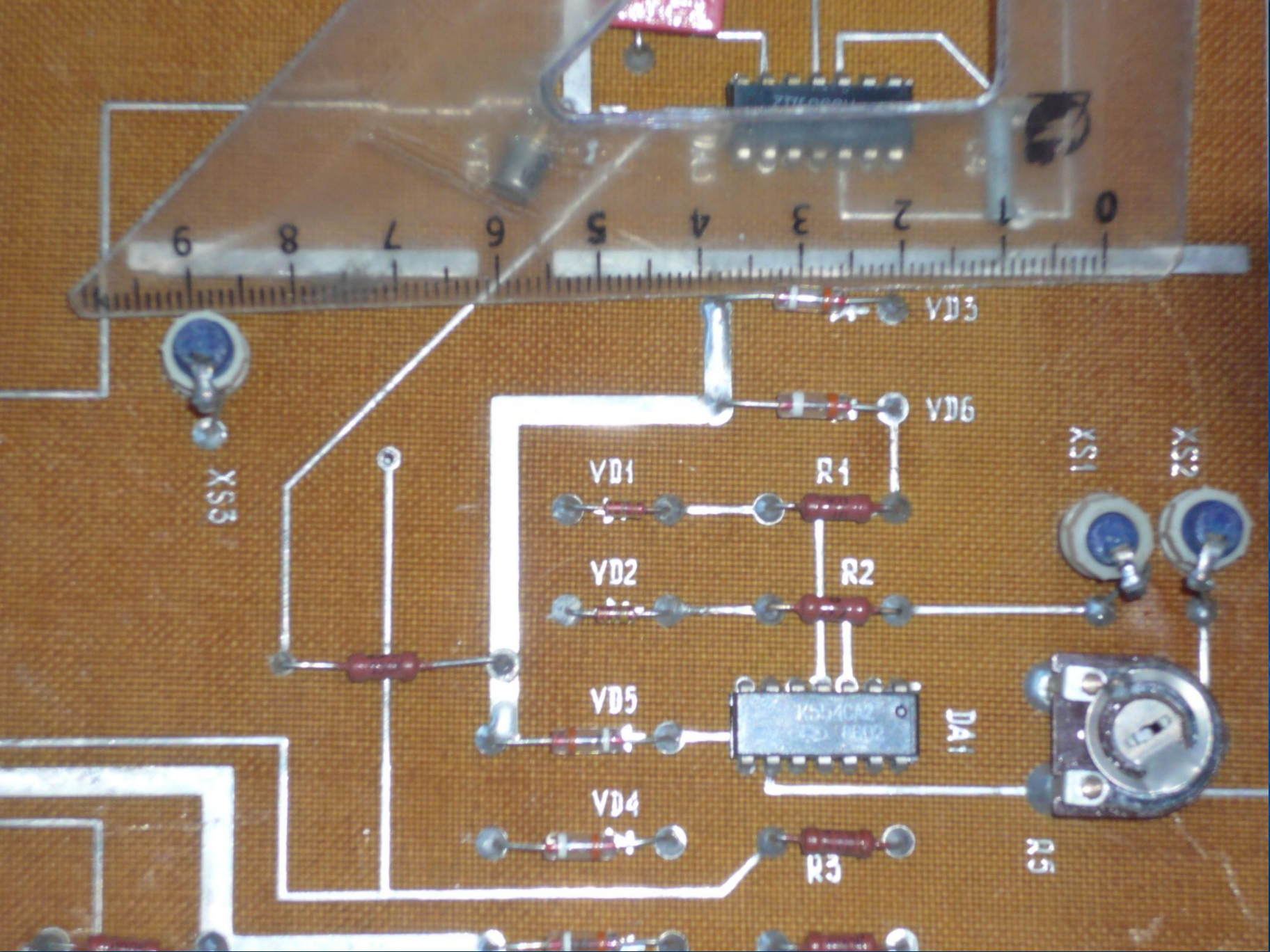
3) Диоды большой мощности ($I_{\text{пр. ср.}} > 10 \text{ A}$)

В настоящее время существуют диоды с $I_{\text{пр. ср.}} = 3800 \text{ A}$

Диоды малой мощности не требуют дополнительного теплоотвода (тепло отводится с помощью корпуса диода)

Для диодов средней и большой мощности, которые не могут эффективно отводить тепло своими корпусами, требуется дополнительный теплоотвод (радиатор – кубик металла, в котором с помощью литья или фрезерования выполняются шипы, в результате чего возрастает поверхность теплоотвода.

Материал - медь, бронза, алюминий, силумин)



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

XS3

VD1

R1

VD6

XS1

XS2

VD2

R2

VD5

K514CA2
E3 1002

DA1

VD4

R3

R5



- 2. Постоянное прямое напряжение ($U_{пр.}$)

Постоянное прямое напряжение – это падение напряжения между анодом и катодом при протекании максимально допустимого прямого постоянного тока.

Проявляется особенно при малом напряжении питания.

Постоянное прямое напряжение зависит от материала диодов (германий - Ge, кремний - Si)

Синоним этого параметра – напряжение насыщения.

$U_{\text{пр. Ge}} \approx 0.3 \div 0.5 \text{ В}$ (Германиевые)

$U_{\text{пр. Si}} \approx 0.5 \div 1 \text{ В}$ (Кремниевые)

Германиевые диоды обозначают – ГД (1Д)

Кремниевые диоды обозначают – КД (2Д)

- 3. Повторяющееся импульсное обратное максимальное напряжение ($U_{\text{обр. max}}$)

Электрический пробой идет по амплитудному значению (импульсу) $U_{\text{обр. max}} \approx 0.7 U_{\text{Эл. пробоя}}$ (10 ÷ 4500 В)

Для мощных диодов $U_{\text{обр. max}} = 1200 \text{ В}$.

Этот параметр иногда называют классом диода (Для 12 класса диода $U_{\text{обр. max}} = 1200 \text{ В}$)

- 4. Максимальный обратный ток диода ($I_{\text{max ..обр.}}$)

Соответствует максимальному обратному напряжению (порядок величины – микроамперы или миллиамперы в зависимости от мощности диода).

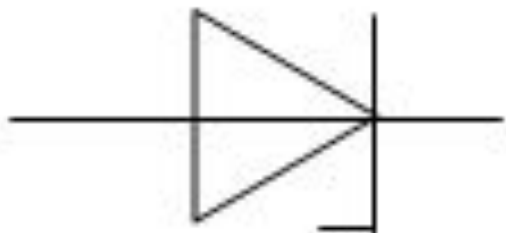
Для кремниевых диодов максимальный обратный ток в два раза меньше, чем для германиевых

- 5. Дифференциальное (динамическое) сопротивление.

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

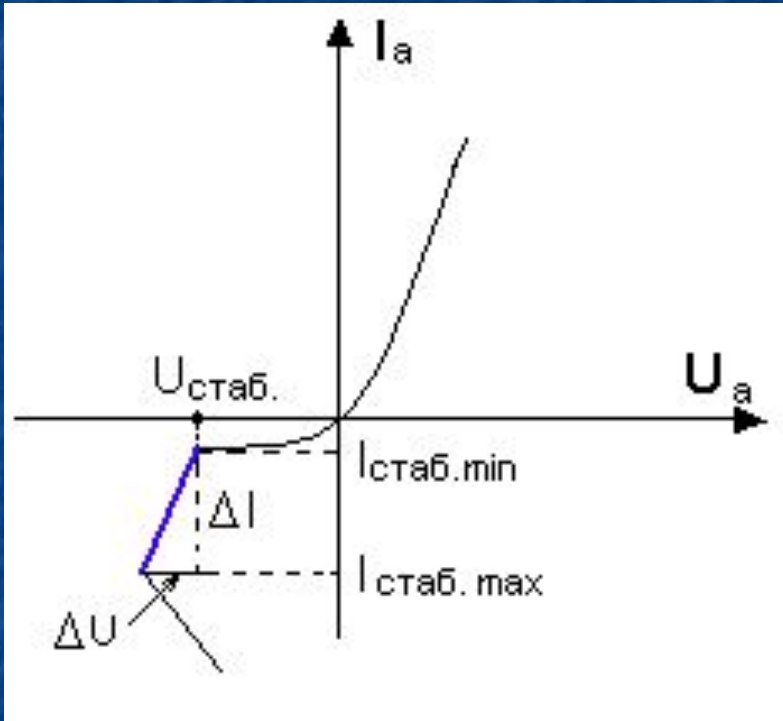
Стабилитроны

Обозначение на схемах:



- Стабилитрон – это разновидность диода. Применяется для ограничения электрических сигналов по току и напряжению.
- Используются в стабилизаторах напряжения.

Вольт-амперная характеристика стабилитрона



- Рабочим участком является участок электрического пробоя.
- $U_{\text{стаб.}}$ — напряжение стабилизации
- $I_{\text{стаб.min}}$ — минимальный ток стабилизации
- $I_{\text{стаб.max}}$ — максимальный ток стабилизации

- В справочнике дается среднее значение $U_{\text{стаб.}}$. Есть разброс порядка 10 %.
- Для достижения требуемого значения стабилитроны могут включаться последовательно.

Рабочий ток стабилитрона лежит в пределах от минимального до максимального тока стабилизации.

$$I_{\text{ст. min}} \leq I_a \leq I_{\text{ст. max}}$$

Степень наклона рабочего участка, характеризуется динамическим сопротивлением

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

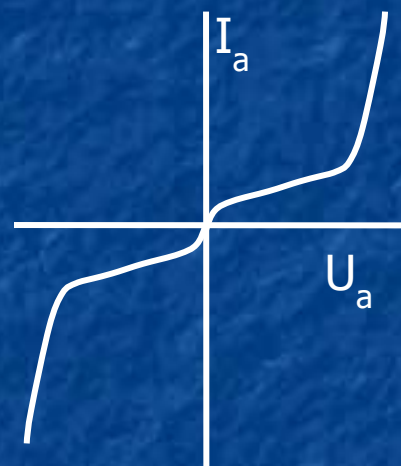
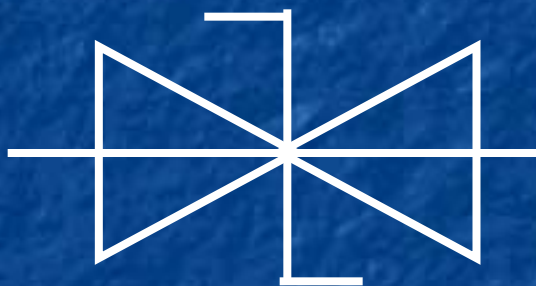
Для идеального стабилитрона $R_{\text{д}}=0$.

$$U_{\text{стаб.}} = 3 \div 200 \text{ В}$$

- Ещё один паспортный параметр – ТКН (температурный коэффициент напряжения). Показывает на сколько вольт (или на сколько процентов) изменяется $U_{\text{стаб}}$ при изменении температуры на один градус Цельсия.

- Выпускаются ещё и двуханодные стабилитроны.

Это фактически два стабилитрона, включенные последовательно встречно.



Эти стабилитроны используются для ограничения сигнала в цепях переменного тока.

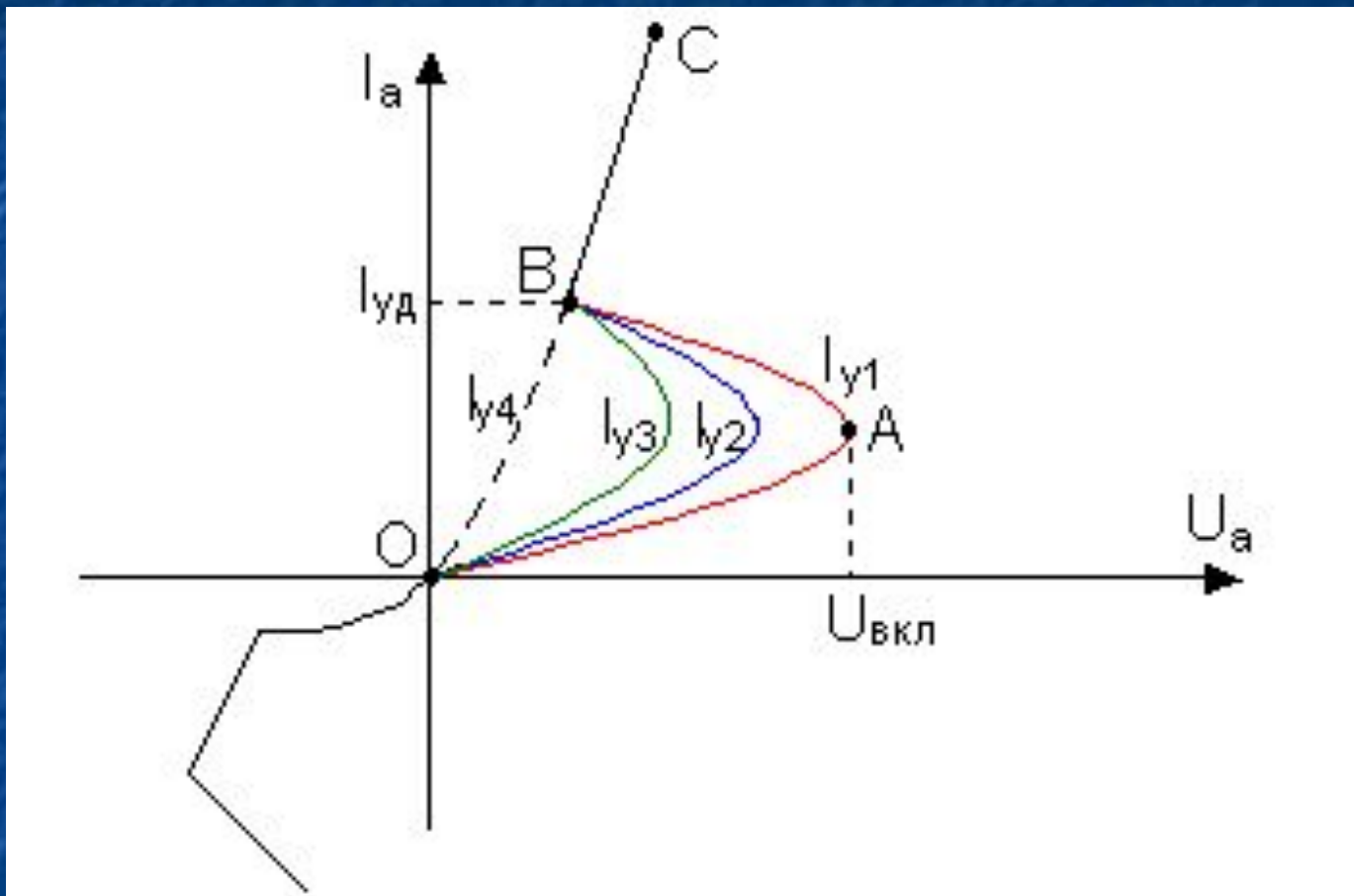
Тиристоры

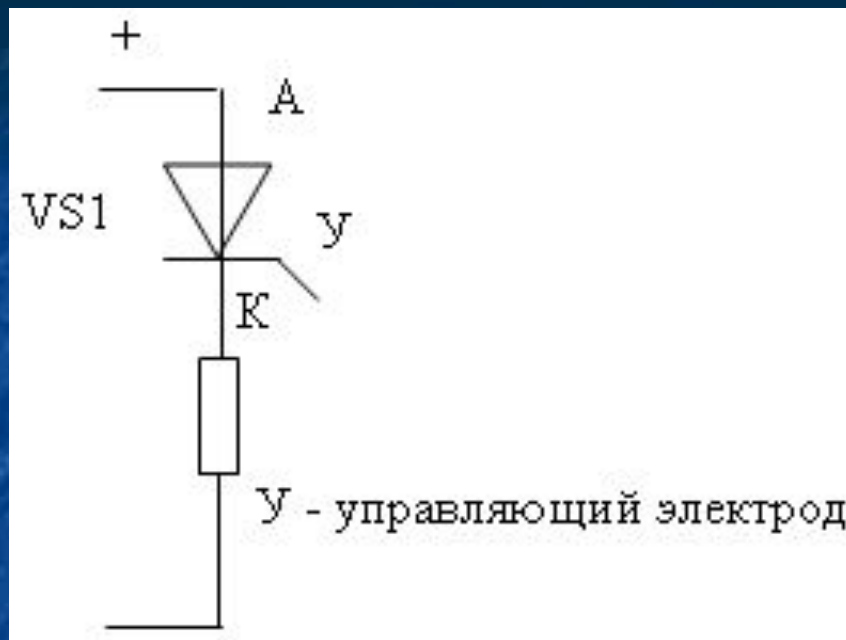
- Тиристор – полупроводниковый прибор с несколькими чередующимися слоями n и p проводимости, четырехслойной структуры p-n-p-n.

Тиристоры предназначены для ключевого управления электрическими сигналами в режиме открыт-закрыт (управляемый диод).

- Название тиристора - от греческого слова thyra (тира), что означает "дверь" или "вход".

Вольтамперная характеристика тиристора.





- Выше приведено схемное обозначение управляемого тиристора (триодный тиристор, тринистор). На практике при употреблении термина "тиристор" подразумевается именно этот элемент.

При положительной полярности: $0 \leq U \leq U_{\text{вкл}}$ - участок OA – через тиристор протекает незначительный ток, можно считать, что тиристор закрыт.

$U_{\text{вкл}}$ - называется напряжением включения. Как только напряжение достигает значения, $U_{\text{вкл}}$ оно лавинообразно снижается – участок AB.

Способ управления повышением напряжения до $U_{\text{вкл}}$ не рекомендуется (тиристор открывается только один раз)

Чем больший ток подан на управляющий электрод, тем «колесо OAB» меньше.

Если $I_{\text{упр}} \geq I_{\text{y4}}$, ($I_{\text{y4}} = I_{\text{упр отп}}$ - управляющий ток отпирания), то ВАХ тиристора совпадет с ВАХ диода.

Когда тиристор вышел на рабочий участок BC, можно отключить ток управления.

При этом тиристор останется в открытом состоянии.

Чтобы закрыть тиристор, необходимо снизить анодный ток до величины тока удержания на достаточное время (время выключения).

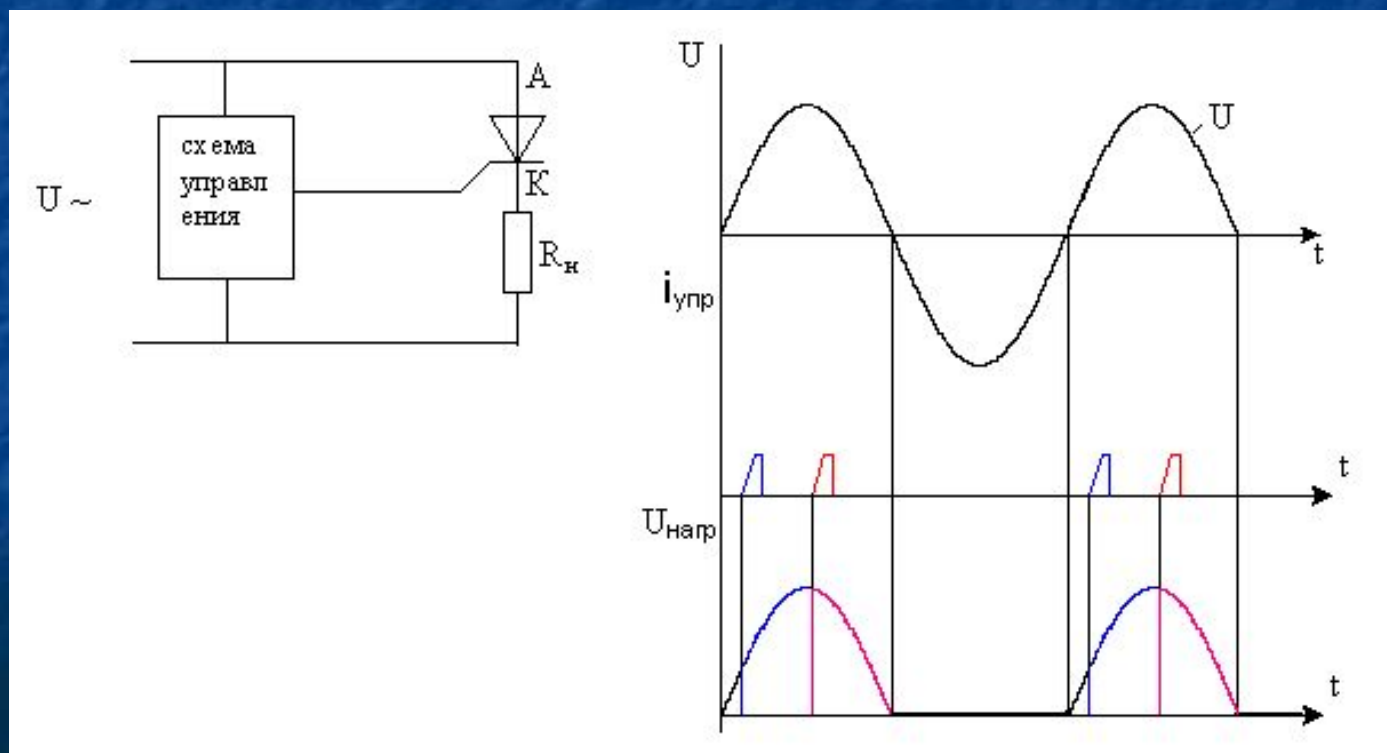
Если тиристор стоит в цепи переменного тока, он закроется при обратной полярности анодного напряжения.

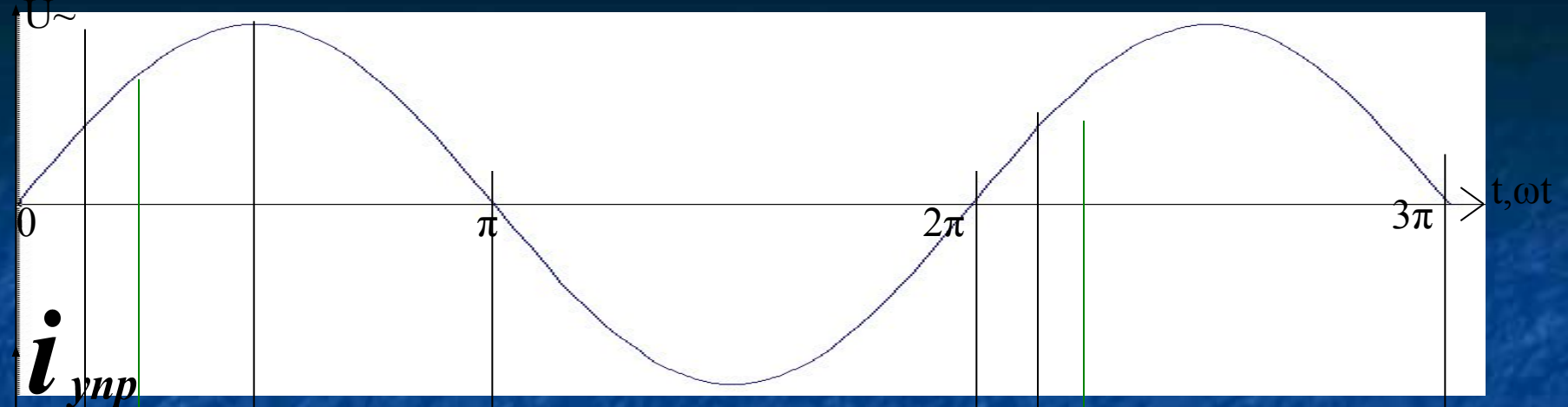
Условия необходимые, для того, чтобы открыть тиристор :

1. Прямая полярность анодного напряжения (плюс приложен к аноду, минус – к катоду).
2. Величина тока в цепи управляющего электрода больше управляющего тока отпирания ($I_{упр\ отп}$).

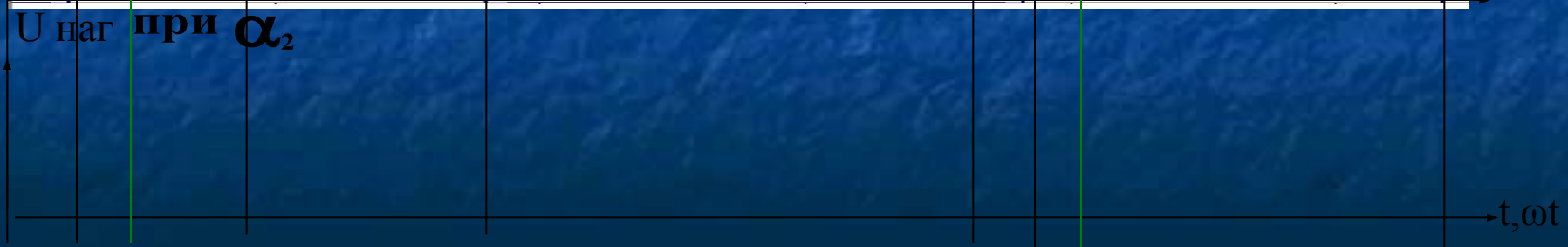
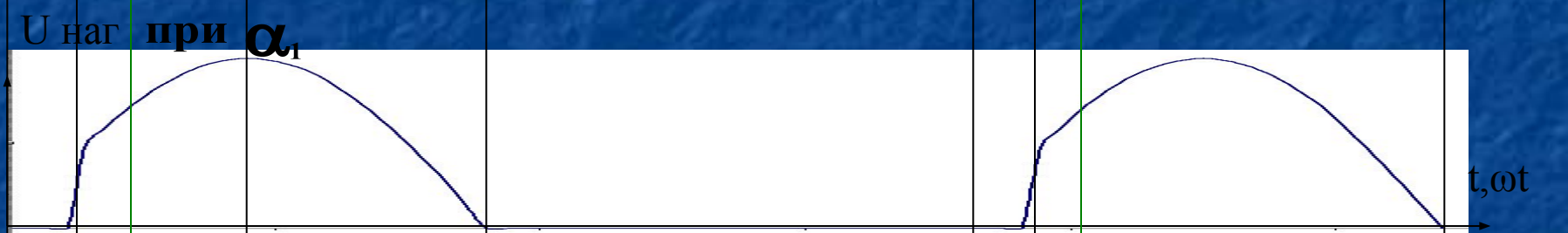
- Существуют тиристоры двух видов:

1. Незапираемые – это тиристоры, управляемые при подачи напряжения и тока на управляющий электрод.
2. Запираемые – их исходное состояние – открыт. Чтобы закрыть запираемый тиристор, необходимо подать ток обратной полярности относительно большой величины.





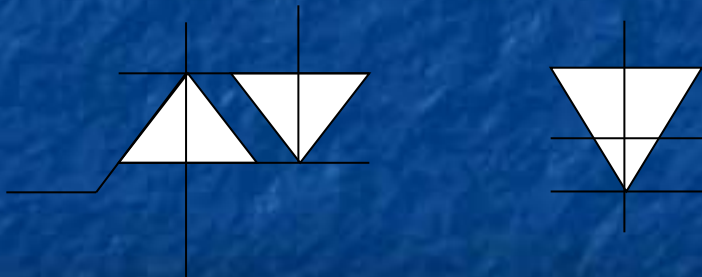
$i_{упр}$



Изменяя угол α (угол управления), можно регулировать среднее напряжение на нагрузке, чем больше α , тем меньше среднее напряжение на нагрузке.

Симметричные тиристоры или симисторы – это два тиристора включенных встречно - параллельно.

Справа дано обозначение неуправляемого тиристора (динистора). Он открывается при приложении между анодом и катодом напряжения больше $U_{\text{вкл}}$



Параметры тиристоров

1. *Напряжение включения ($U_{вкл}$)* – это такое напряжение, при котором тиристор переходит в открытое состояние.
2. *Повторяющееся импульсное обратное напряжение ($U_{обр.мах}$)* – это напряжение, при котором наступает электрический пробой. Для большинства тиристоров $U_{вкл.} = U_{обр.мах}$
3. *Максимально допустимый прямой, средний за период ток.*
4. *Прямое падение напряжения на открытом тиристоре ($U_{пр.} = 0,5 \div 1 \text{ В}$)*
5. *Обратный максимальный ток* – это ток, обусловленный движением неосновных носителей при приложении напряжения обратной полярности.
6. *Ток удержания* – это анодный ток, при котором тиристор закрывается

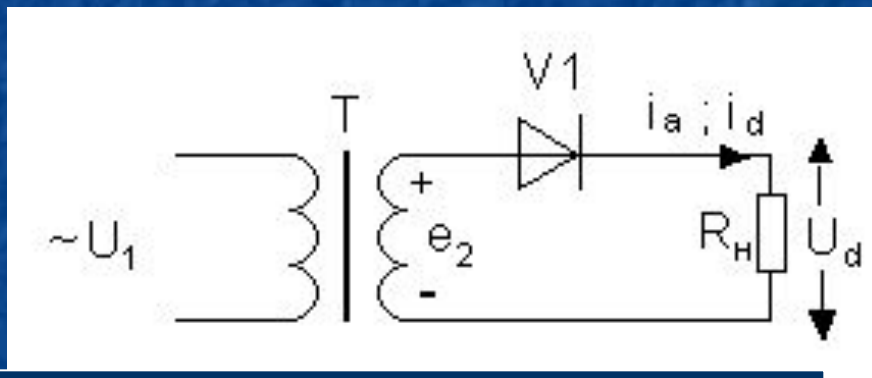
7. *Время выключения* - это время в течение которого закрывается тиристор (от 10 до 500 микросекунд).
8. *Предельная скорость нарастания анодного тока* $\frac{dI_a}{dt}$
Если анодный ток будет быстро нарастать, то р-п переходы будут загружаться током неравномерно, вследствие чего будет происходить местный перегрев и тепловой пробой.
9. *Предельная скорость нарастания анодного напряжения* $\frac{dU_a}{dt}$
Если предельная скорость нарастания анодного напряжения будет больше паспортной, тиристор может самопроизвольно открыться от электромагнитной помехи.
10. *Управляющий ток отпирания* – это ток, который необходимо подать, чтобы тиристор открылся без «колена».
11. *Управляющее напряжение отпирания* - это напряжение, которое необходимо подать, чтобы тиристор открылся без «колена».

***Однофазные схемы
выпрямления***

Различают два способа (схемы) выпрямления:

1. Однополупериодные – ток в нагрузке протекает только при положительной полуволне питающего напряжения.
2. Двухполупериодные – ток в нагрузке протекает при обеих полуволнах.

Однополупериодная схема выпрямления

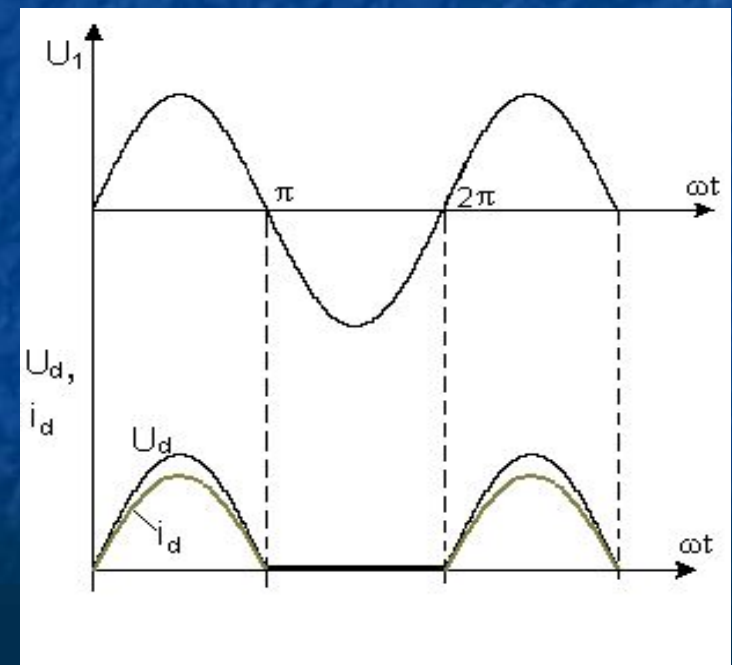


На участке $0 < \omega t < \pi$

$$U_d = e_2$$

На участке $\pi < \omega t < 2\pi$

$$U_d = 0$$

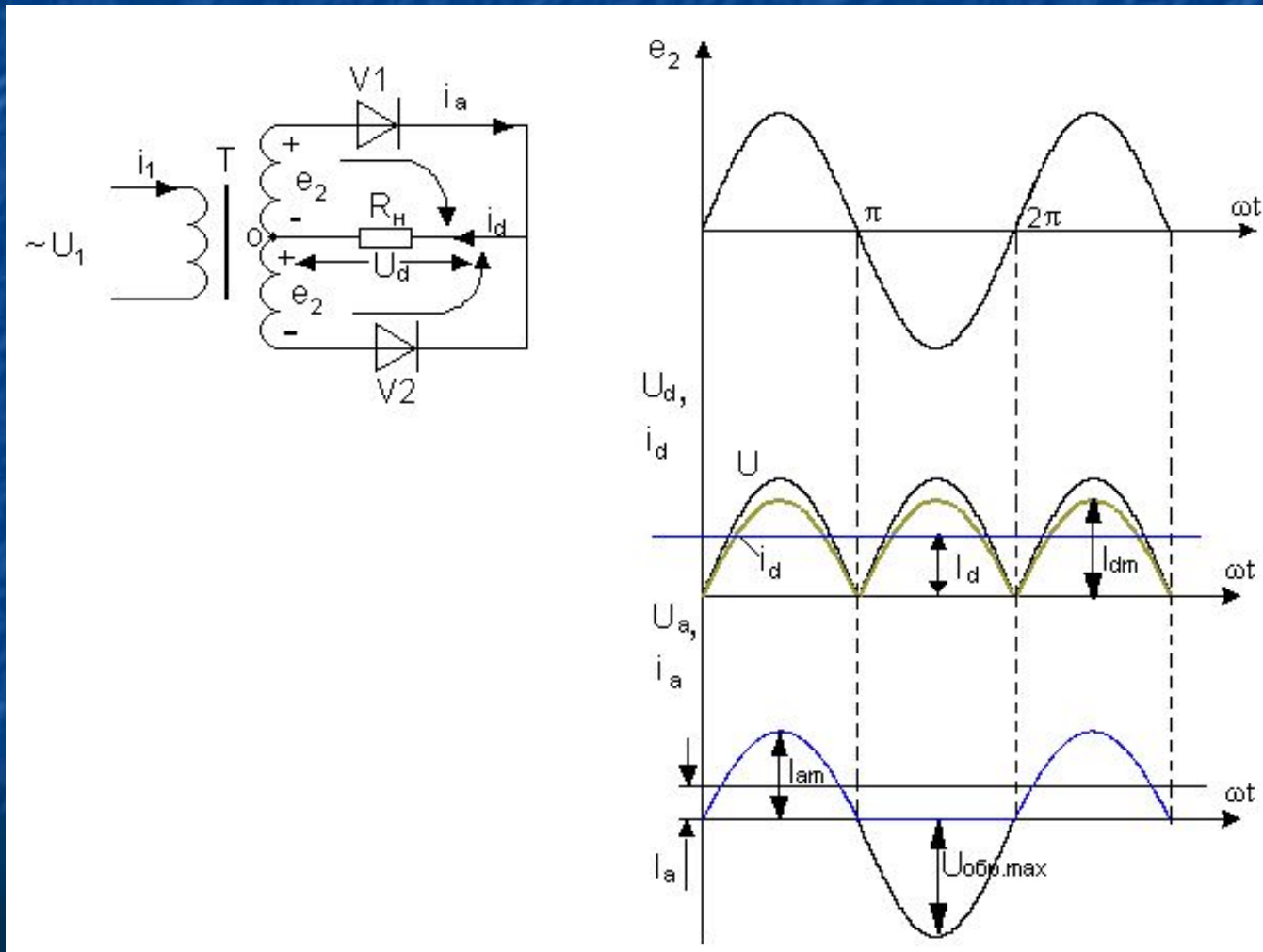


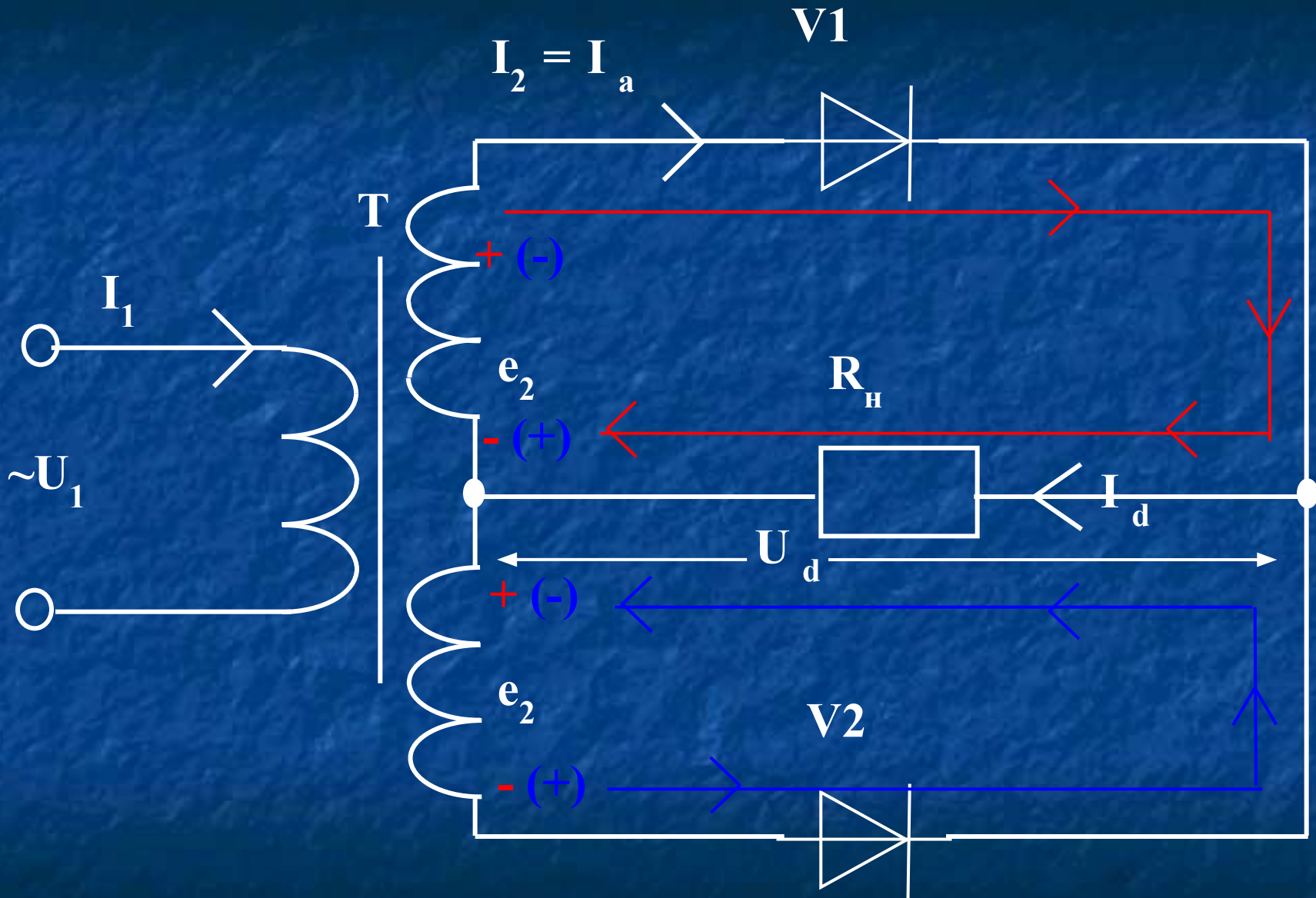
Достоинство однополупериодной схемы выпрямления: простота и дешевизна.

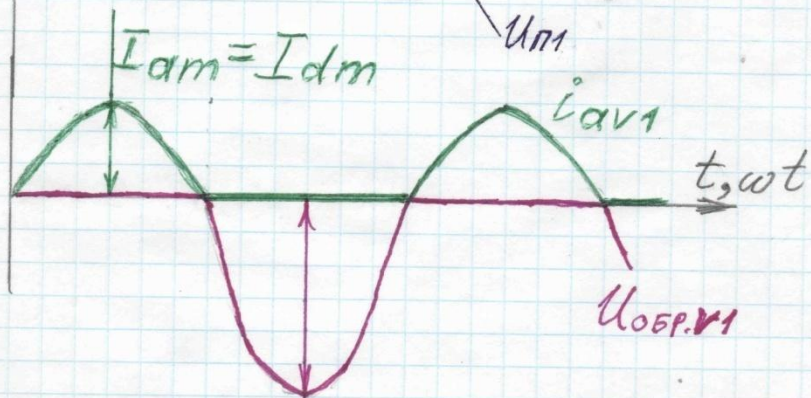
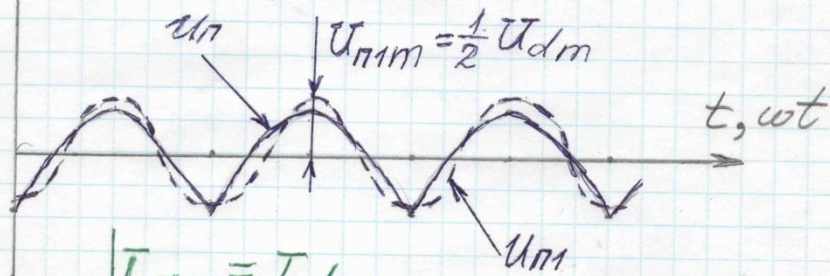
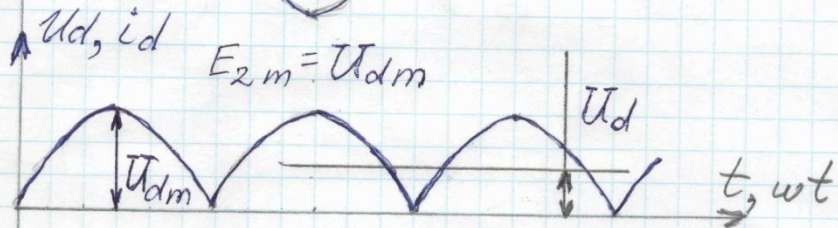
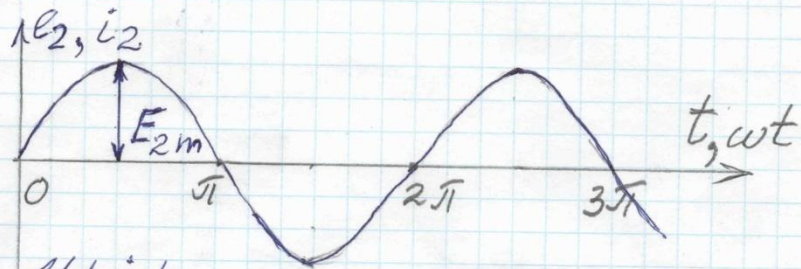
Недостатки однополупериодной схемы выпрямления: токи и напряжения прерывисты, следовательно будет низкая величина среднего значения токов и напряжений в нагрузке. Кроме того, в схеме велик уровень напряжения пульсаций.

Двухполупериодные схемы выпрямления

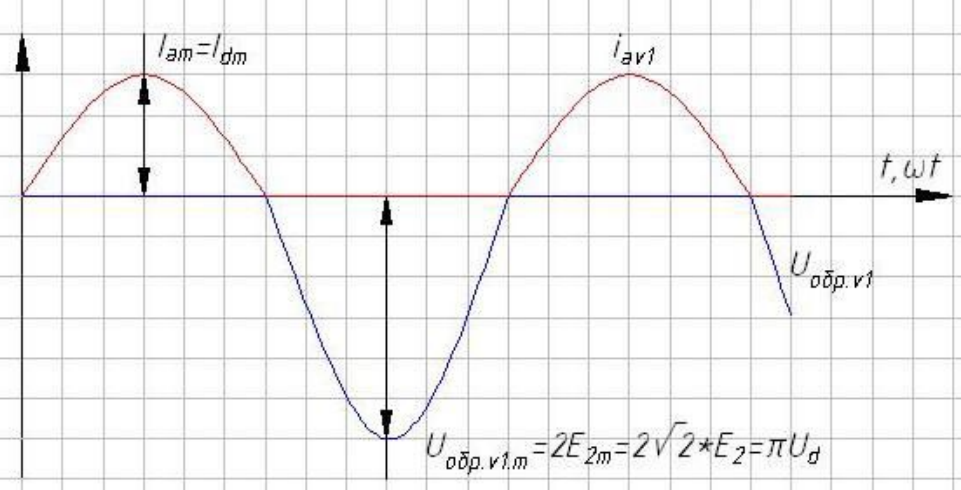
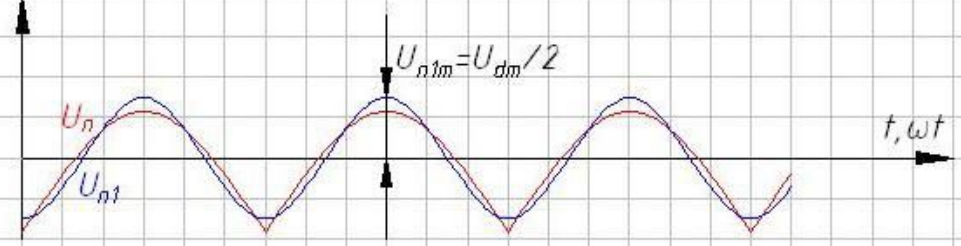
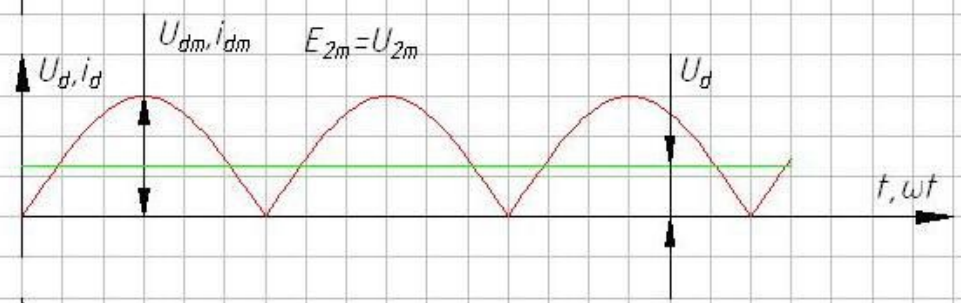
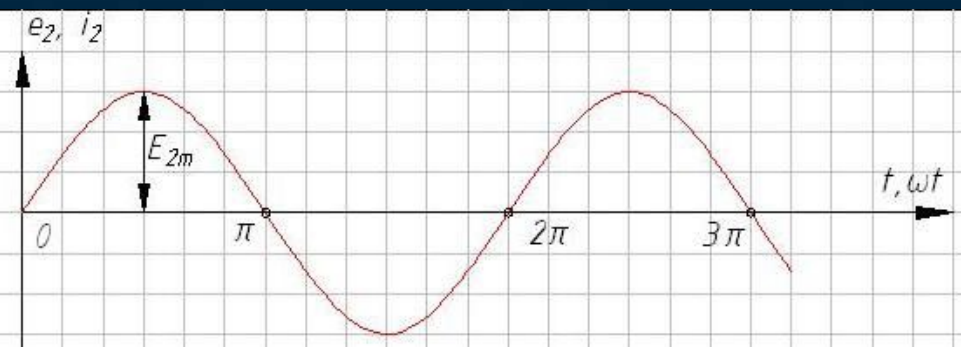
Рассмотрим однофазную двухполупериодную схему выпрямления с нулевой точкой (нулевая схема)







$$U_{obp.v1.m} = 2E_{2m} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot E_2 = \pi \cdot U_d$$



Рассмотрим интервал $0 < \omega t < \pi$:

диод V1 – открыт; диод V2 – закрыт. $U_d = e_2$

$$U_{dm} = E_{2m} = \sqrt{2} \cdot E_2$$

Рассмотрим интервал $\pi < \omega t < 2\pi$:

диод V1 – закрыт; диод V2 – открыт.

Токи и напряжения имеют одинаковую полярность, но в каждый момент времени изменяют свою величину (ток и напряжение в нагрузке имеют пульсирующий характер).

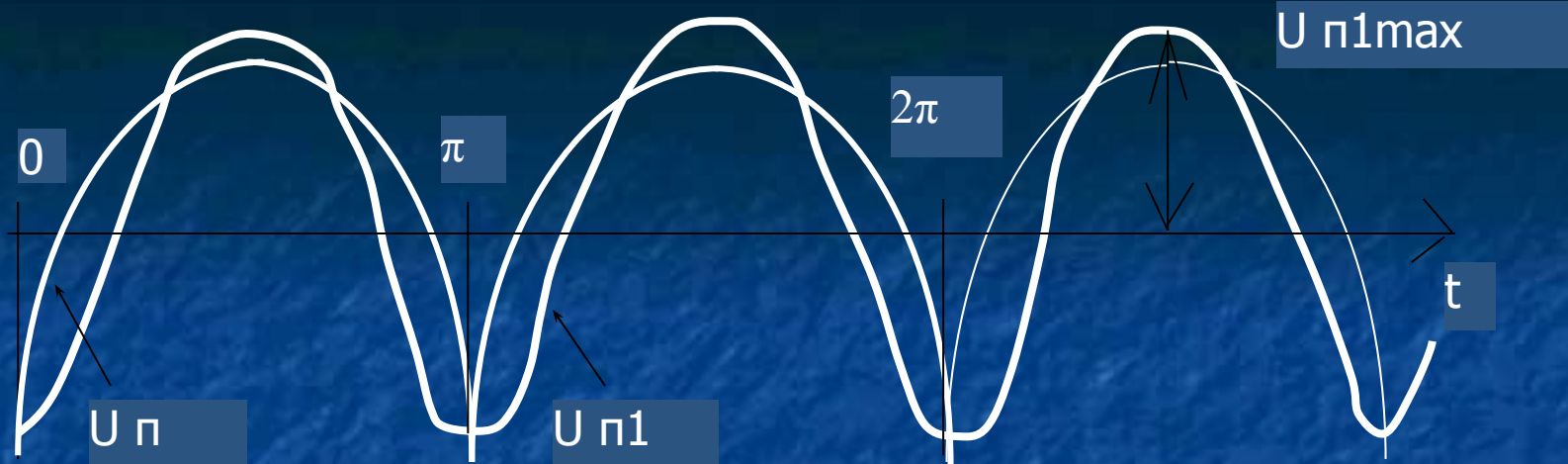
Выпрямленное напряжение содержит как постоянную, так и переменную составляющую.

$$\mathbf{u}_d(\mathbf{t}) = \mathbf{U}_d + \mathbf{u}_\Pi(\mathbf{t})$$

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_{dm} \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} E_2 \sin \omega t d\omega t = \\ &= -\frac{\sqrt{2} E_2}{\pi} \cos \omega t \Big|_0^\pi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.9 E_2 \end{aligned}$$

$$u_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.9 E_2$$

$$E_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} u_d = 1.11 U_d$$



$U_{\text{п}}$ – переменная составляющая выпрямленного напряжения (напряжение пульсаций);

$U_{\text{п1}}$ – первая гармоника $U_{\text{п}}$.

Период питающего напряжения $T = 2\pi$

Период выпрямленного напряжения $T = \pi$

Наибольшую величину в кривой выпрямленного напряжения имеет 1-ая гармоника, частота которой $\omega_{\text{п}}$ в 2 раза выше частоты питающей сети.

Эту гармонику наиболее трудно подавить фильтрами, поэтому по ее величине судят об искажении выпрямленного напряжения.

На рисунке штриховой линией показана первая гармоника напряжения пульсаций.

Пульсация выпрямленного напряжения характеризуется коэффициентом пульсации.

Коэффициент пульсаций $q = \frac{U_{п1max}}{U_d}$

Здесь $U_{п1max}$ – амплитуда первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения (синоним – амплитуда первой гармоники напряжения пульсаций).

U_d – постоянная составляющая (среднее за период значение выпрямленного напряжения).

Из разложения в ряд Фурье кривой выпрямленного напряжения получим в общем виде формулу :

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}$$

, где m – кратность частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения к частоте сети (число фаз выпрямления или пульсность выпрямителя).

Последняя формула справедлива только при чисто активной нагрузке !!!

Определим коэффициент пульсации для нашего рассмотренного случая

Чем меньше коэффициент пульсации, тем меньше уровень пульсации, а следовательно выше качество выпрямленного напряжения.

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}$$

$$q = \frac{2}{2^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0.67$$

Основными параметрами для выбора диода являются:

1. Прямой средний за период анодный максимальный ток.

$$I_d = \frac{U_d}{R_H}$$

- среднее значение тока, протекающего через нагрузку.

$$I_{am} = I_{dm}$$

Так как для тока i_a одна полуволна отсутствует, а для тока нет, получаем:

$$i_d$$

$$I_a = \frac{I_d}{2}$$

2. Обратное напряжение.

$$U_{\text{обр.т}} = 2Em_2 = 2\sqrt{2}E_2 = \frac{2\sqrt{2}}{2\sqrt{2}}\pi U_d = \pi U_d$$

Так как :

$$E_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d$$

$$u_{\text{обр.т}} = \pi u_d$$

Активная мощность, отдаваемая в нагрузку определяется действующим значением выпрямленного напряжения :

$$U_d \text{ действ} = E_2 \quad P_H = \frac{E_2^2}{R_H}$$

Мощность, выделяемая на нагрузке от постоянной составляющей выпрямленного тока и напряжения определяется средним значением напряжения :

$$U_d = 0,9E_2$$
$$P_d = \frac{u_d^2}{R_H} = \frac{(0,9E_2)^2}{R_H} = \frac{0,81E_2^2}{R_H} = 0,81P_H$$

Следовательно, около 20% всей мощности в нагрузку передается переменной составляющей. Это также говорит о некачественном выпрямлении.

Для уменьшения пульсации (уменьшения переменной составляющей) применяются фильтры.

Расчетная мощность трансформатора:
(при активно - индуктивной нагрузке)

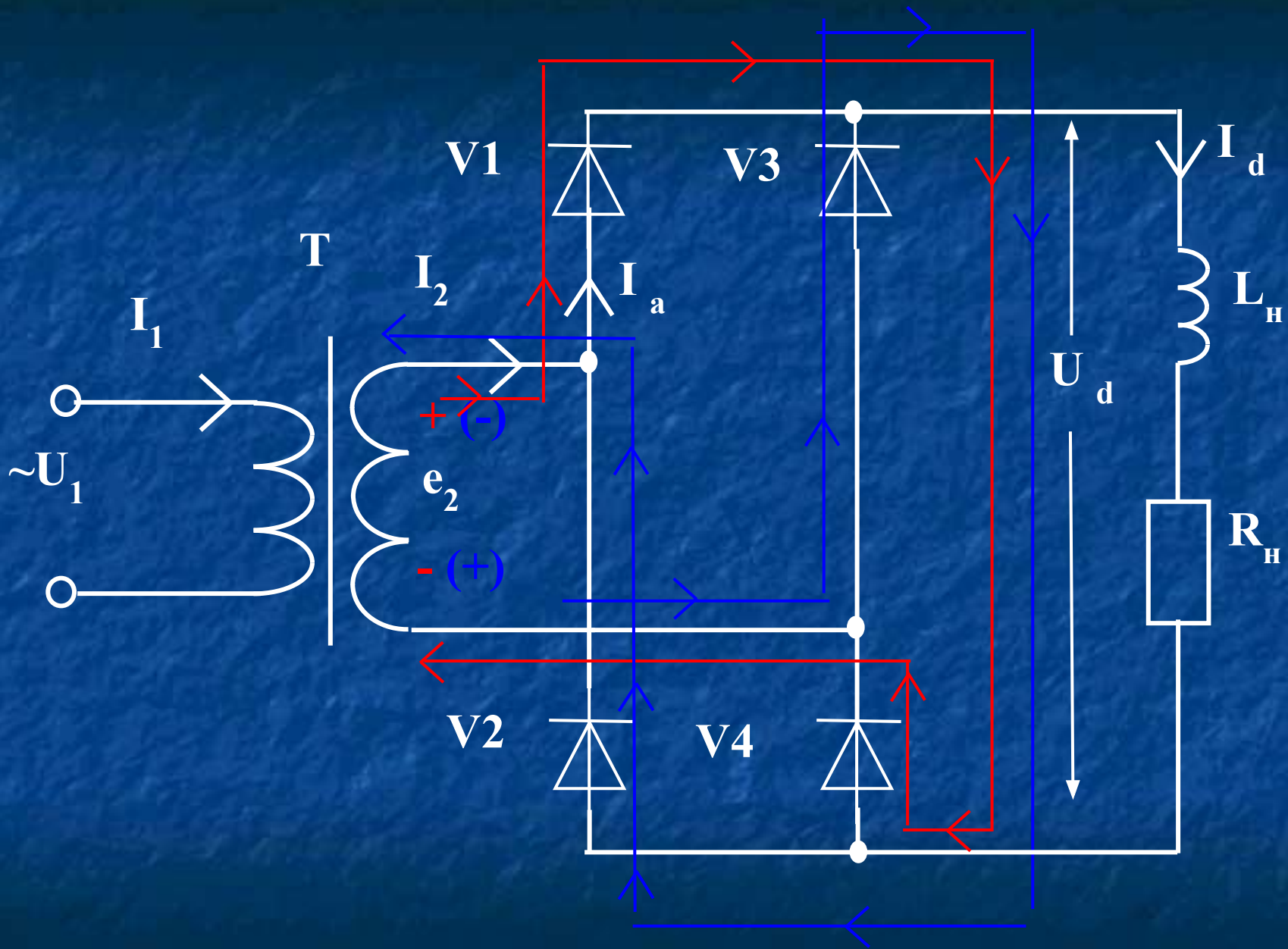
$$S_T = 1,34 P_d = 1,34 U_d I_d$$

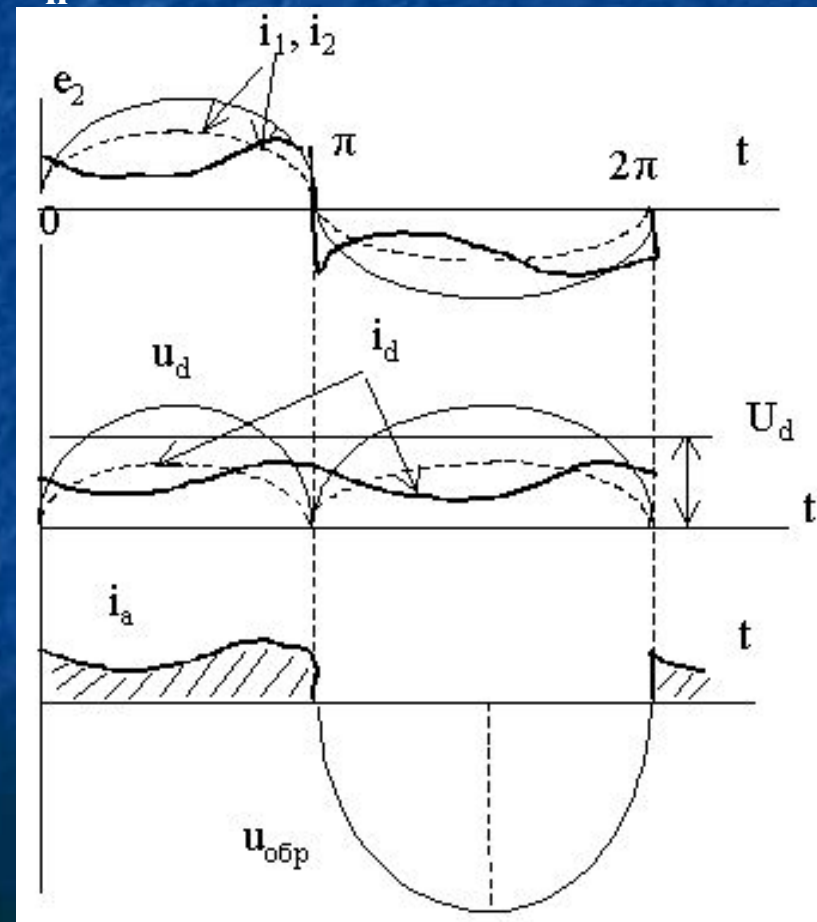
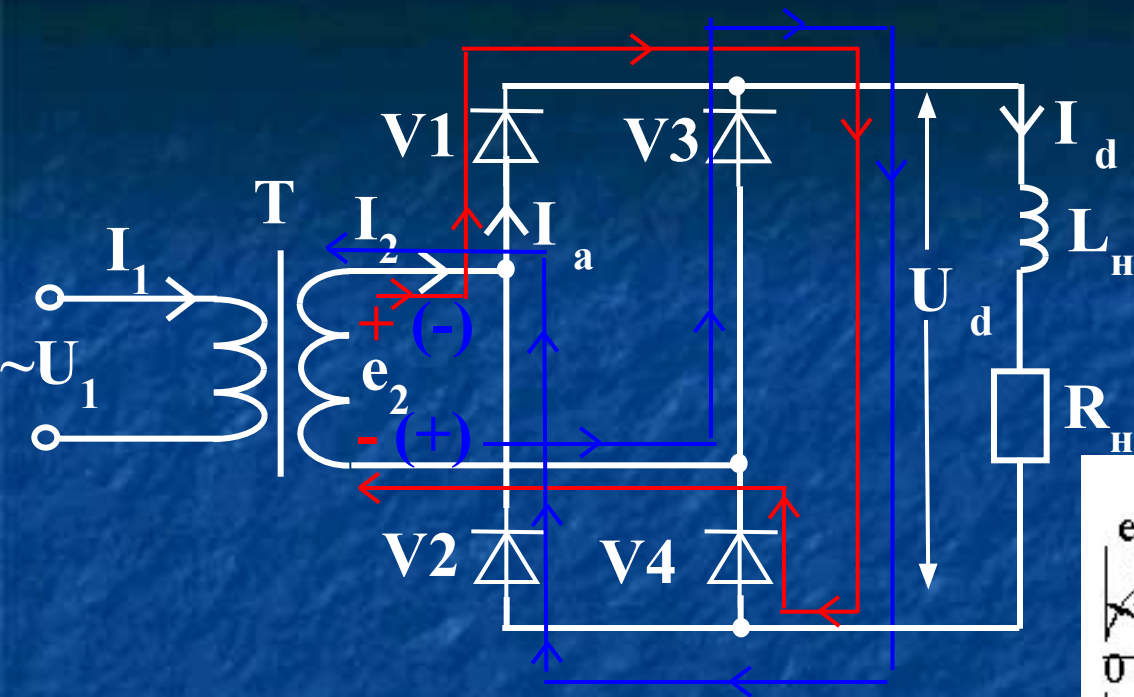
Последняя формула приводится без вывода.



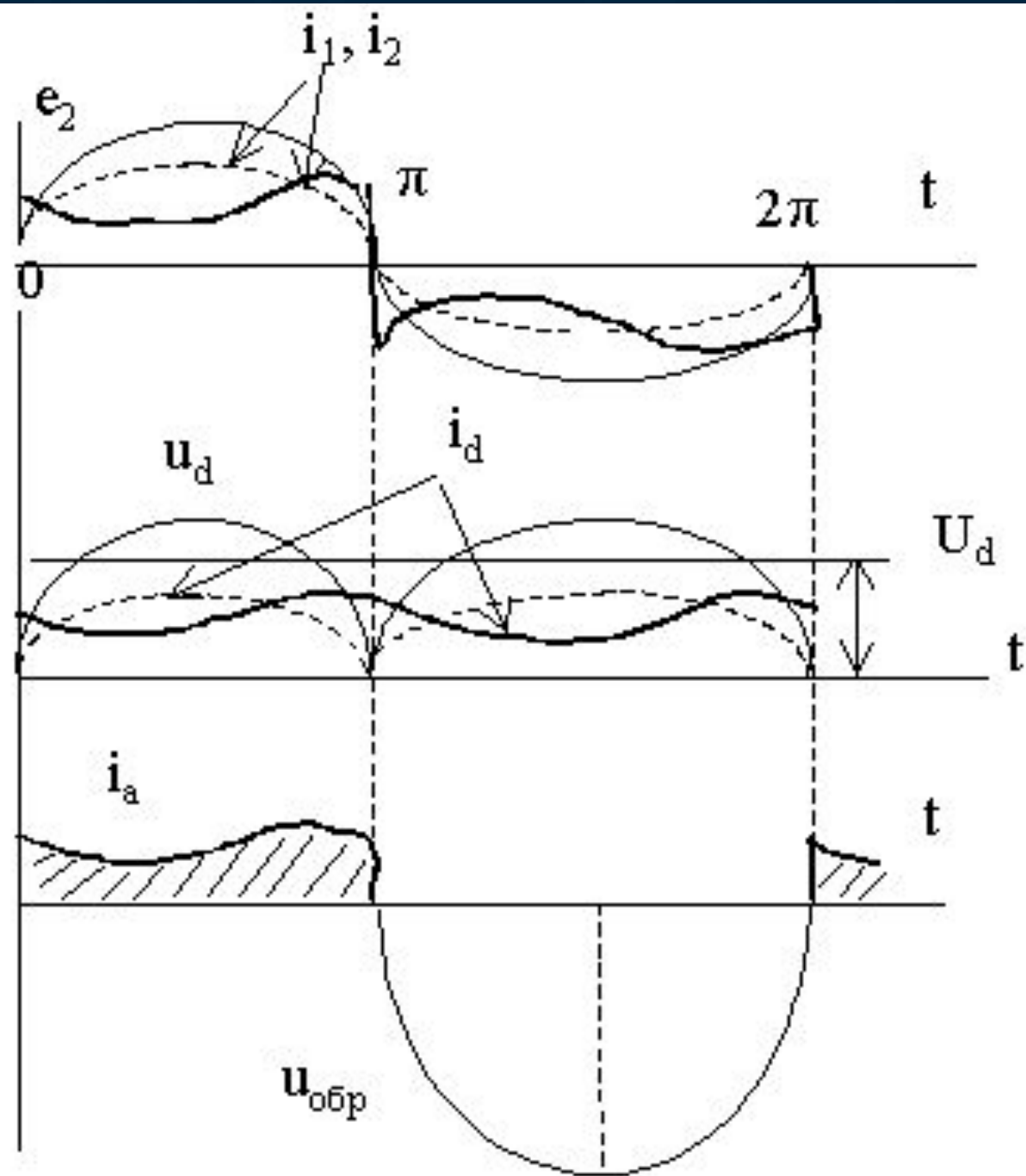
Электроника

***Однофазная двухполупериодная
мостовая схема выпрямления***





Мостовая схема может работать и без трансформатора, а схема с нулевой точкой нет



При положительной полуволне ЭДС e_2 (интервал $0-\pi$) и указанной на рисунке полярности выпрямленный ток будет протекать через диод $V1$, нагрузку $R_H L_H$ и диод $V4$. Диоды $V2$ и $V3$ находятся под обратным напряжением и тока не проводят (плюс приложен к катоду, а минус к аноду).

При изменении полярности переменного напряжения e_2 (интервал $\pi \div 2\pi$) открываются $V2$ и $V3$ и ток i_d сохраняет направление.

Если нагрузка активная ($L_H = 0$), то ток i_d повторяет форму напряжения на нагрузке, а i_1 и i_2 имеют синусоидальную форму (штриховые¹ кривые)

Если $L_H \neq 0$, она препятствует изменению тока и i_d не будет успевать следовать за изменением u_d и будет сглаживаться (сплошная линия i_d). Также будет наблюдаться отстающий фазовый сдвиг.

При значительной индуктивной нагрузке ($X_L = \omega_H L_H > 10R_H$) ток i_d из-за малых пульсаций можно считать постоянным (идеально сглаженным).

При значительной индуктивной нагрузке передача активной мощности в нагрузку переменной составляющей тока отсутствует. Токи i_a , i_1 , принимают форму прямоугольных импульсов.

При R-L нагрузке, как и при активной, форма u_d повторяет e_2 , а его значение определяется как и для нулевой схемы с активной нагрузкой.

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.9E_2 \quad \text{или} \quad E_2 = 1.11U_d$$

Пренебрежем потерями в L_H , диодах и трансформаторе и положим $i_d = I_d$ (идеально сглажен)

$$I_d = \frac{U_d}{R_H}$$

Ток в диоде $I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{U_d}{2R_H}$ и $I_{a \max} = I_d$

$$U_{обр.м} = E_{2m} = \sqrt{2}E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{2}}\pi U_d = \frac{\pi}{2}U_d \quad S_T = 1.11P_d$$

$$U_{обр.м} = \frac{\pi}{2}U_d$$

Достоинства схемы с нулевой точкой:

1. Меньшее число диодов \Rightarrow меньшая стоимость.
2. Последовательно обтекается всегда только один диод и нагрузка \Rightarrow при малом питающем напряжении, падение напряжения будет меньше.

Недостатки схемы с нулевой точкой:

1. Не работает без трансформатора.
2. S_T больше на 20% \Rightarrow больше габариты и выше цена.
3. Обратное напряжение больше в два раза.

Применяется при малых напряжениях питания.

Достоинства мостовой схемы:

1. Может работать без трансформатора, если нас устраивает входное напряжение.
2. S_T на 20% меньше \Rightarrow меньше габариты и ниже цена.
3. В два раза меньше обратное напряжение для диодов.

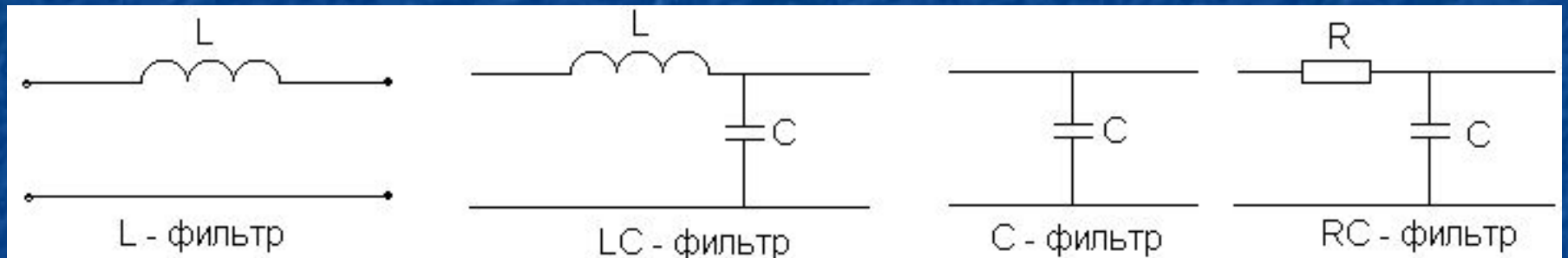
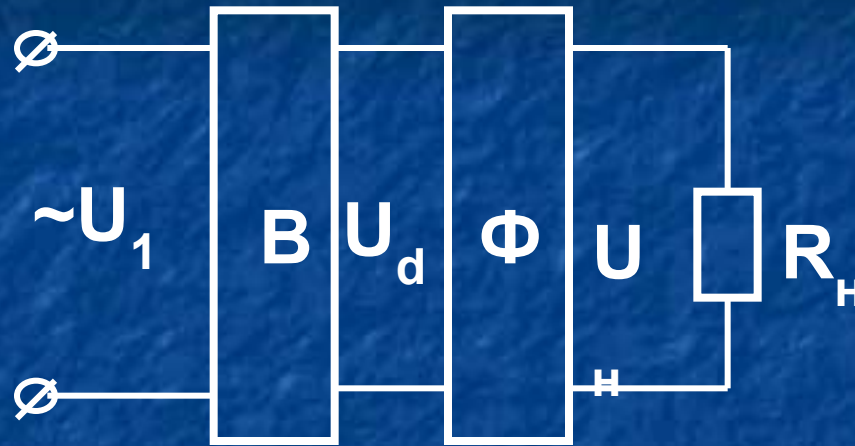
Недостатки мостовой схемы:

1. В два раза большее число диодов.
2. Падение напряжения в два раза больше, так как последовательно с нагрузкой током обтекаются два диода.

Мостовая схема применяется при $E_2 = 10 \div$ сотен Вольт.

Фильтры выпрямителей

Назначение: Улучшение качества выпрямленного напряжения путем ослабления переменной составляющей.



- Коэффициент сглаживания: $S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}$ - характеризует (количественно) ослабление переменной составляющей. Чем больше коэффициент сглаживания, тем лучше.

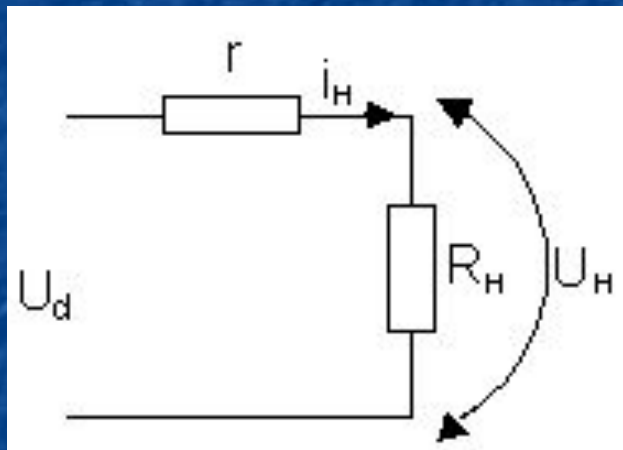
$$S = \frac{\frac{U_{n1m}}{U_d}}{\frac{U_{nn1m}}{U_H}} = \frac{U_{n1m} U_H}{U_d U_{nn1m}}$$

Здесь U_{nn1m} – амплитуда первой гармоники пульсаций на выходе фильтра;

U_H – среднее значение напряжения на выходе фильтра.

Рассмотрим как передаются фильтром постоянная и переменная составляющие выпрямленного напряжения.

Схема замещения для постоянной составляющей выпрямленного напряжения L и L-C фильтра:



r – активное сопротивление катушки индуктивности. Конденсатора в схеме нет, т. к. постоянный ток через него не проходит.

$$U_H = U_d \frac{R_H}{R_H + r}$$

Должно быть $r \ll R_H$ чтобы постоянная составляющая передавалась без потерь.

Схема замещения для переменной составляющей выпрямленного напряжения L и L-C фильтра:



Переменная составляющая – это первая гармоника

$$\omega_{\text{п}} = 2\omega_{\text{сети}}$$

Здесь $Z_{\text{посл}}$ – комплексное сопротивление последовательного элемента фильтра.

$Z_{\text{ПАР}}$ – комплексное сопротивление параллельного элемента фильтра, включая $R_{\text{н}}$.

Чем больше $Z_{\text{посл}}$ и меньше $Z_{\text{ПАР}}$, тем меньше переменная составляющая и больше S .

Поэтому делают $\omega_{\text{п}} \cdot L \gg R_{\text{н}}$.

Для L-фильтра:

$$Z_{\text{ПОСЛ}} = \omega_{\text{П}} \cdot L \quad \omega_{\text{П}} \cdot L \gg R_{\text{Н}}$$

$$Z_{\text{ПАР}} = R_{\text{Н}} \quad r \ll R_{\text{Н}}$$

$$U_{\text{НП1м}} = I_{\text{П1м}} \cdot R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{П1м}}}{\sqrt{(\omega_{\text{П}}L)^2 + R_{\text{Н}}^2}} R_{\text{Н}}$$

$$S = \frac{U_{\text{П1м}} U_{\text{Н}}}{U_{\text{НП1м}} U_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{П1м}} U_{\text{д}} R_{\text{Н}} \sqrt{(\omega_{\text{П}}L)^2 + R_{\text{Н}}^2}}{(r + R_{\text{Н}}) U_{\text{П1м}} U_{\text{д}} R_{\text{Н}}} = \frac{\sqrt{(\omega_{\text{П}}L)^2 + R_{\text{Н}}^2}}{r + R_{\text{Н}}}$$

В приведенной выше формуле выходные напряжения фильтра $U_{\text{Н}}$ и $U_{\text{НП1м}}$ выражены через входные напряжения фильтра $U_{\text{д}}$ и $U_{\text{П1м}}$.

$$U_{\text{Н}} = U_{\text{д}} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + r}$$

$$S = \frac{U_{\text{п1м}} U_{\text{н}}}{U_{\text{нп1м}} U_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{п1м}} U_{\text{д}} R_{\text{н}} \sqrt{(\omega_{\text{п}} L)^2 + R_{\text{н}}^2}}{(r + R_{\text{н}}) U_{\text{п1м}} U_{\text{д}} R_{\text{н}}} = \frac{\sqrt{(\omega_{\text{п}} L)^2 + R_{\text{н}}^2}}{r + R_{\text{н}}}$$

Ранее объяснены неравенства: $r \ll R_{\text{н}}$ и $R_{\text{н}} \ll \omega_{\text{н}} L$
 \Rightarrow

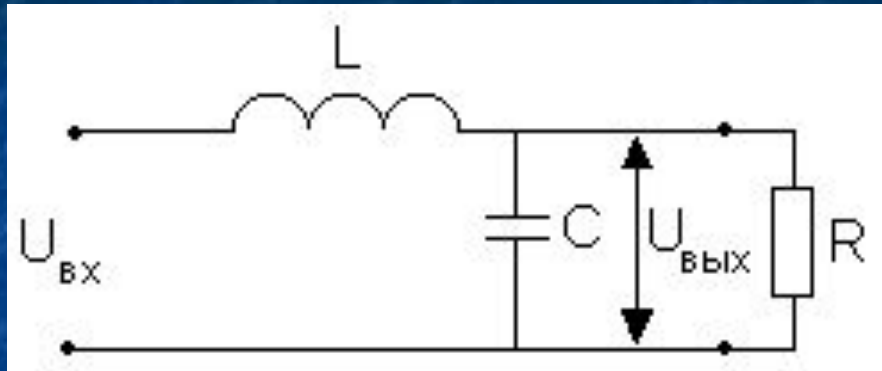
$$S = \frac{\omega_{\text{н}} L}{R_{\text{н}}}$$

$$S = \frac{|Z_{\text{посл}}|}{|Z_{\text{нар}}|}$$

Чем меньше $R_{\text{н}} \Rightarrow$ тем больше S
 Индуктивный фильтр эффективен в
 «сильноточных» схемах, где $R_{\text{н}}$ - мало.

«Сильноточная» схема – это схема, где протекают большие (сильные) токи.

Коэффициент сглаживания для LC – фильтра:



Емкость шунтирует нагрузку по переменной составляющей.

Условие эффективного шунтирования переменной составляющей: $X_c = \frac{1}{\omega_n C}$ должно быть $< 0.1 R_H$

$$Z_{нар} = \frac{1}{\omega_n C}$$

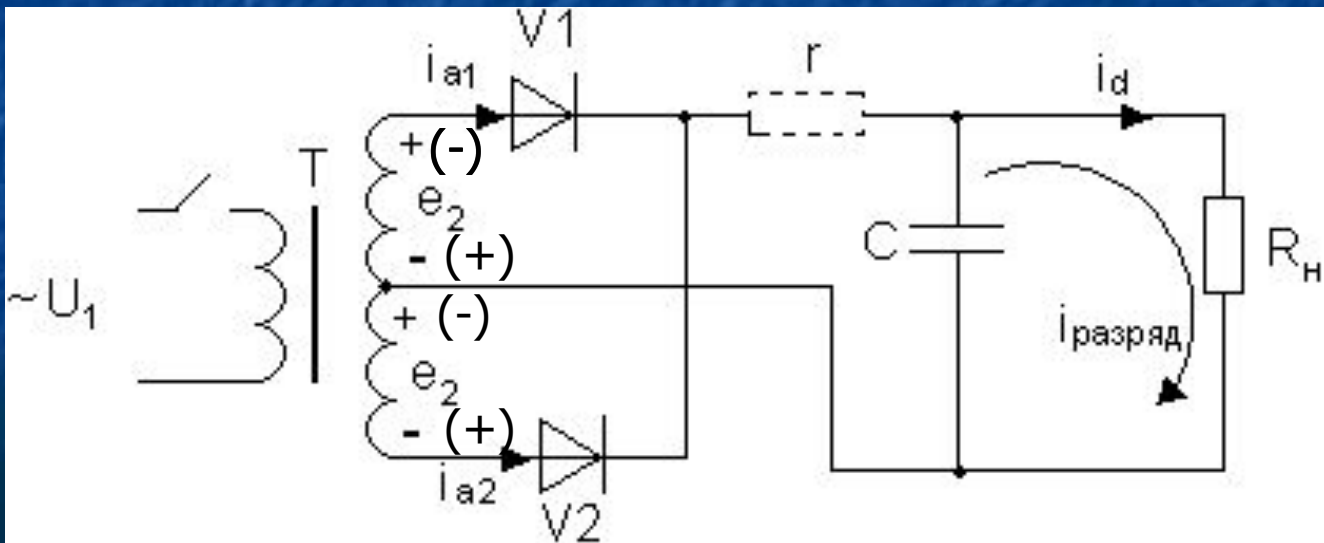
$$S = \frac{|Z_{посл}|}{|Z_{нар}|} = \frac{\omega_n L}{\frac{1}{\omega_n C}} = \omega_n^2 LC$$

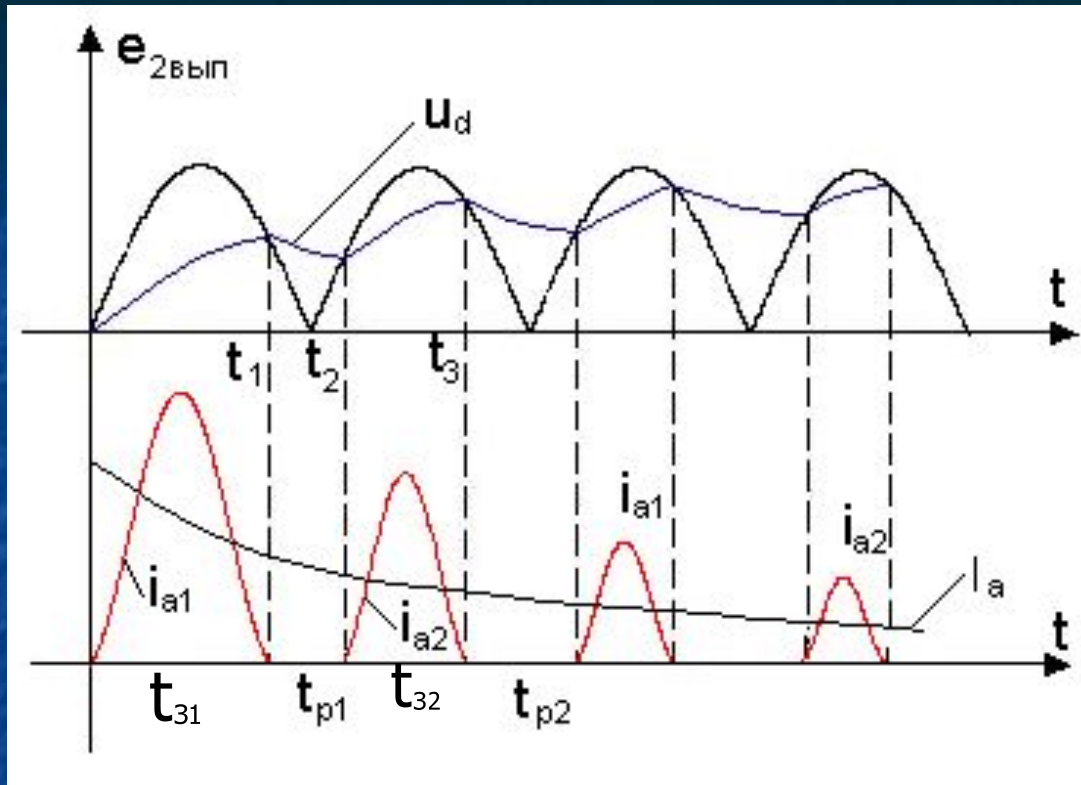
$$S = \omega_n^2 LC$$

- Из чего следует, что
LC- фильтры более эффективны

Ёмкостный и R-C фильтр. (Работа выпрямителя на R-C нагрузку).

Ёмкостные и R-C фильтры используются при нагрузке потребляющей малые токи от выпрямителя ("слаботочная" нагрузка, т.е. нагрузка с малым ("слабым") током).





- r - активное сопротивление диодов и обмоток трансформатора

Рассмотрим, что происходит в схеме в разные промежутки времени:

1. $0 < t < t_1$ $e_2 > u_d$, $V1$ – открыт, $V2$ – закрыт. \Rightarrow конденсатор заряжается импульсом тока i_{a_1}
2. $t_1 < t < t_2$ $e_2 < u_d$, \Rightarrow конденсатор разряжается на нагрузку (R_H). $V1$ и $V2$ – закрыты.
3. $t_2 < t < t_3$ $e_2 > u_d$, $V2$ – открыт, $V1$ – закрыт. \Rightarrow конденсатор заряжается импульсом тока i_{a_2}

Амплитуда второго импульса будет меньше первого, т. к. на конденсаторе в момент t_2 $u_d > 0$

По мере увеличения напряжения u_d время заряда конденсатора уменьшается, а время разряда увеличивается.

Через несколько периодов наступает положение, когда u_d изменяется возле своего среднего установившегося значения.

$I_{am} = (5 \div 7) i_a$ Т.к. ток i_a - прерывистый, с паузами.
Возникает необходимость введения дополнительного сопротивления r для токоограничения.

На нём происходит дополнительное падение напряжения и, следовательно, выходное напряжение уменьшается.

Чем больше R_H , тем больше время разряда

R_H

$$\tau_p = CR_H \Rightarrow$$

$$\downarrow U_{n1m} \Rightarrow \uparrow u_d \Rightarrow \downarrow q$$

Здесь q – коэффициент пульсаций.

$S_c = 1$

Коэффициент сглаживания ёмкостного фильтра равен 1!

При холостом ходе $R_H = \infty$, $U_{dxx} = E_{2m} = \sqrt{2} \cdot E_2$

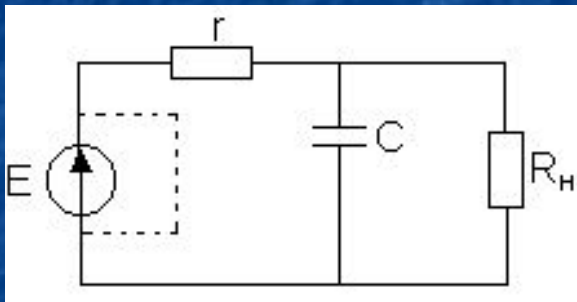
Можно отметить следующие отличия работы выпрямителей с ёмкостной нагрузкой по сравнению с активной нагрузкой:

1. Больше амплитуда анодного тока и меньше его длительность.

2. Больше величина u_d (постоянная составляющая).
3. Меньше амплитуда переменной составляющей - U_{n1m}
4. Резкая зависимость u_d от R_H .

Коэффициент сглаживания R-C фильтра

Схема замещения переменной составляющей:



Источник питания ближе к источнику ЭДС, так как его внутреннее сопротивление мало \Rightarrow r и R_H включены параллельно.

Значит

$$\underline{Z}_{\text{посл}} = r \parallel R_H$$

$$S = \frac{|Z_{\text{посл}}|}{|Z_{\text{пар}}|} = \frac{r * R_H}{r + R_H} \omega_p C$$

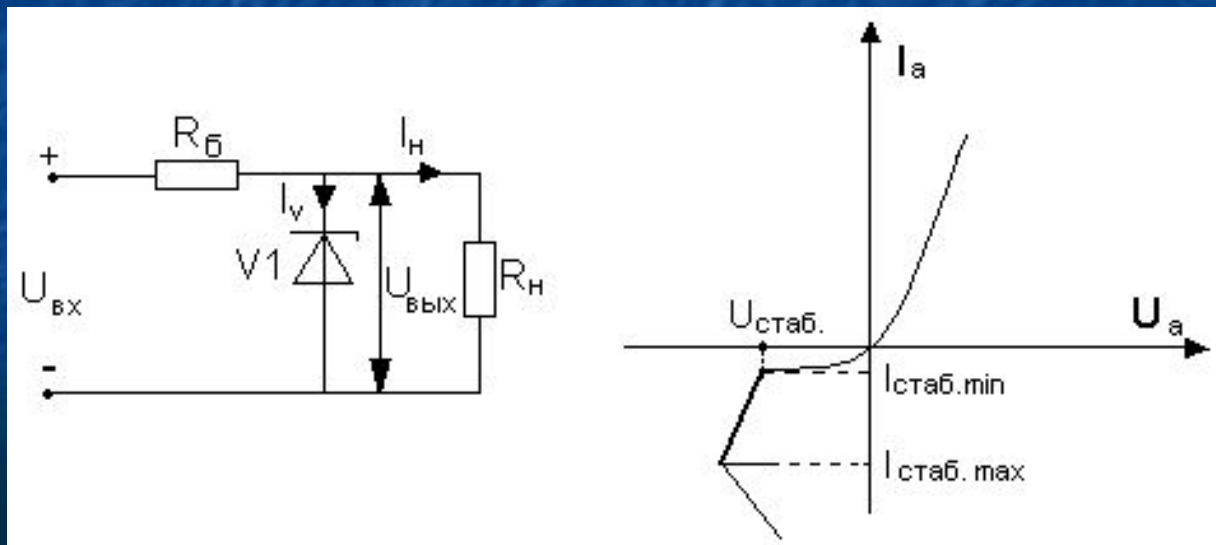
За счет падения напряжения на сопротивлении r снижается напряжение $u_d \Rightarrow$ R-C фильтр эффективен при малых токах нагрузки.

*Параметрический стабилизатор
напряжения.*

Назначение: Поддерживает напряжение на нагрузке примерно постоянным при изменяющемся входном напряжении и токе нагрузки в некотором диапазоне.

Типы стабилизаторов:

1. Параметрический
2. Компенсационные
3. Импульсные (самые современные, но и самые сложные и дорогие)



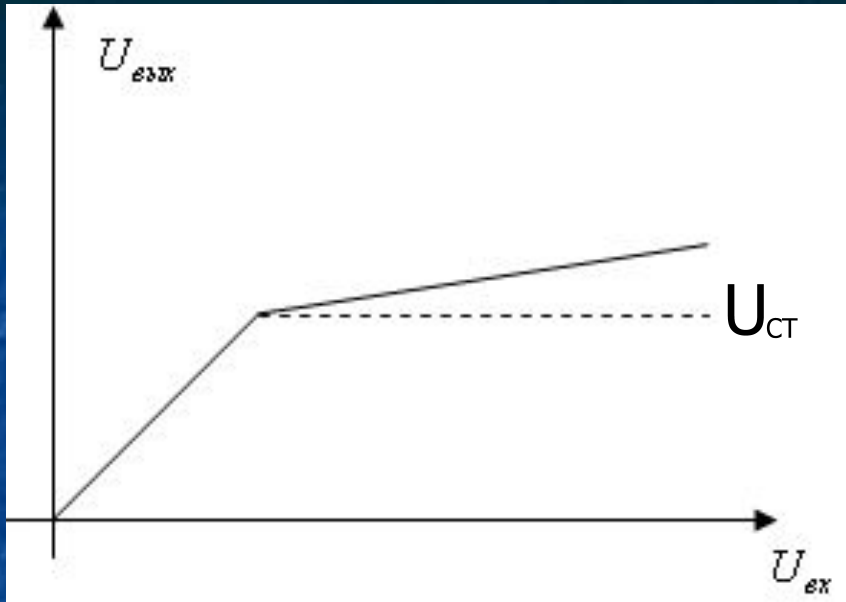
До электрического пробоя, (а это стабилизация) $I_V \approx 0$ и стабилизатор работает как делитель напряжения.

При определенном $U_{ВХ}$ стабилитрон пробивается и при увеличении $U_{ВХ}$

$$U_{ВЫХ} = U_{СТ} \approx \text{const} \quad I_H \approx \text{const}$$

Чем $\uparrow U_{ВХ} \Rightarrow$ тем $\uparrow I_V$

(только на рабочем участке)



$u_{ВХ} = (I_H + I_V)R_6 + u_{СТ}$ - на рабочем участке - участке электрического пробоя.

Стабилитрон забирает на себя часть тока нагрузки I_H при увеличении входного напряжения $u_{вх}$.

$$u_{ВХ} = R_6 I_H + R_6 I_V + u_{СТ}$$

$$I_V = \frac{u_{ВХ} - u_{СТ} - I_H R_6}{R_6}$$

$$I_H = \frac{u_{СТ}}{R_H} = \text{const}$$

$$I_V = \frac{u_{\text{ВХ}} - u_{\text{СТ}} - u_{\text{СТ}} \frac{R_{\sigma}}{R_H}}{R_{\sigma}} = \frac{u_{\text{ВХ}} - u_{\text{СТ}} \left(1 + \frac{R_{\sigma}}{R_H} \right)}{R_{\sigma}}$$

При $R_H = \infty$ и $I_H = 0$ $I_V = I_{V \text{ max}}$

$$I_{V \text{ max}} = \frac{u_{\text{вх max}} - u_{\text{см}}}{R_{\sigma}}$$

Должно выполняться условие: $I_{V \text{ max}} \leq I_{\text{ст. max}}$

При $R_{H \text{ min}} \neq 0$ $I_H = I_{H \text{ max}}$ $I_V = I_{V \text{ min}}$

$$I_{V \text{ min}} = \frac{u_{\text{вх. min}} - u_{\text{см}} \left(1 + \frac{R_{\sigma}}{R_{H \text{ min}}} \right)}{R_{\sigma}}$$

Должно выполняться условие:

$$I_{V \text{ MIN}} \geq I_{\text{СТ. MIN}}$$

$$I_V = \frac{u_{ВХ} - u_{СТ}}{R_6} - I_H$$

Току $I_{v. \min}$ соответствует $U_{ВХ.\min}$ и $I_{H.\max}$

Току $I_{v. \max}$ соответствует $U_{ВХ.\max}$ и $I_{H.\min}$

$$R_6 = \frac{u_{ВХ} - u_{СТ}}{I_H + I_V} \Rightarrow R_6 \text{ лежит в пределах:}$$

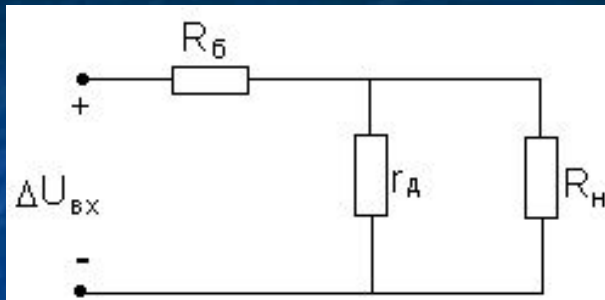
$$\frac{u_{ВХ.\max} - u_{СТ}}{I_{СТ.\max} + I_{H.\min}} \leq R_6 \leq \frac{u_{ВХ.\min} - u_{СТ}}{I_{СТ.\min} + I_{H.\max}}$$

■ Коэффициент стабилизации

Коэффициент стабилизации своей величиной показывает, насколько хорошо стабилизатор поддерживает выходное напряжение в заданных пределах.

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta u_{\text{ВХ}}^*}{\Delta u_{\text{ВЫХ}}^*} = \frac{u_{\text{ВХ}}}{\Delta u_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\Delta u_{\text{ВХ}} u_{\text{ВЫХ}}}{\Delta u_{\text{ВЫХ}} u_{\text{ВХ}}}$$

Схема замещения для приращения напряжения:



$r_д$ - дифференциальное сопротивление стабилитрона.

$$\Delta u_{вых} = \Delta u_{вх} \frac{r_д \parallel R_н}{R_б + r_д \parallel R_н}$$

Учитывая, что в стабилизаторе $r_д \ll R_б$ и $r_д \ll R_н \Rightarrow \Delta u_{вых} \approx \Delta u_{вх} \frac{r_д}{R_б + r_д} \approx \Delta u_{вх} \frac{r_д}{R_б}$

Значит $\Delta u_{вых} \cdot R_б = \Delta u_{вх} \cdot r_д$

$$\frac{\Delta u_{вх}}{\Delta u_{вых}} = \frac{R_б}{r_д}$$

Тогда выражение для коэффициента стабилизации можно записать в следующем виде:

$$K_{ст} = \frac{\Delta u_{вх}}{\Delta u_{вых}} \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \frac{R_б u_{вых}}{r_д u_{вх}}$$

$$K_{ст} < 20 \div 40$$

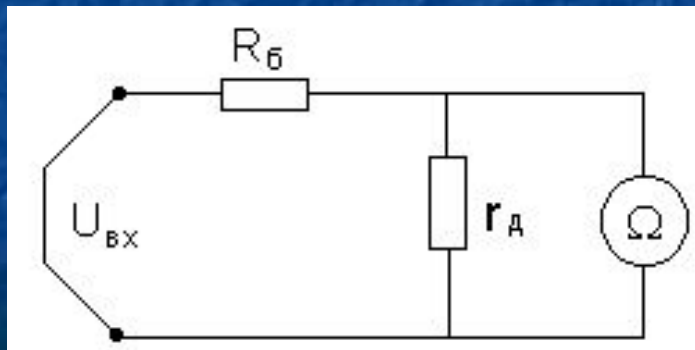
$$K_{ст} = \frac{R_б u_{вых}}{r_д u_{вх}}$$

Для увеличения K_{CT} надо увеличивать R_6 , но при этом будет уменьшаться $U_{ВЫХ}$, поэтому задача решается компромиссным путем.

Потому обычно соблюдается условие $u_{вх} \approx (1.2 \div 1.3)u_{вых}$

Выходное сопротивление стабилизатора определяется по теореме об эквивалентном генераторе.

При этом : у идеального стабилизатора выходное сопротивление равно нулю, у реального оно составляет от нескольких единиц до десятков Ом.



$$R_{ВЫХ} = r_Д \parallel R_6 \approx r_Д$$

Биполярные транзисторы

Предназначены для усиления сигналов и управления током в схемах полупроводниковой электроники.

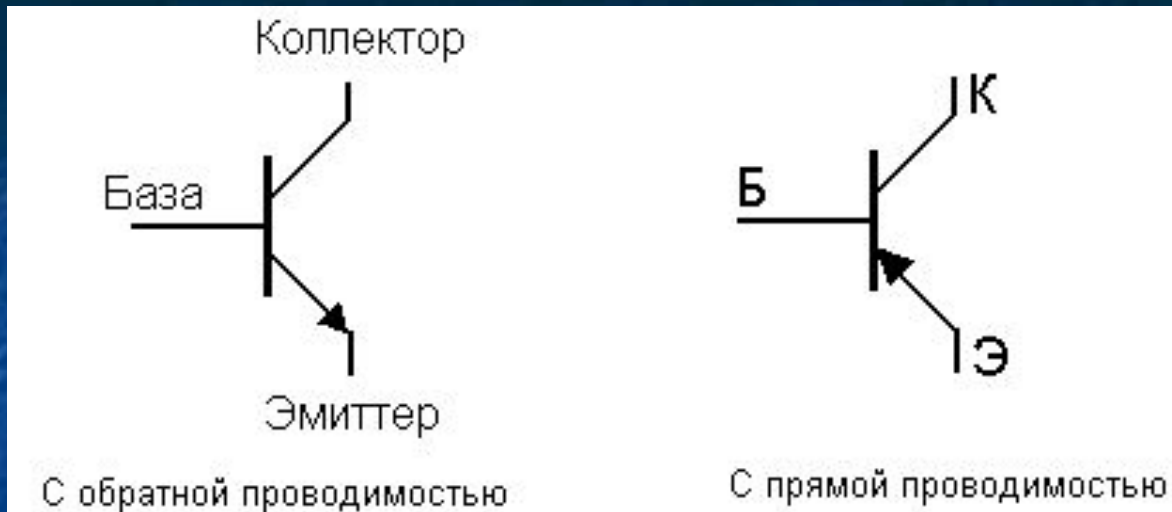
Представляют из себя трехслойную структуру с чередующимися слоями проводимости, имеют три вывода для подключения к внешней цепи.

В этой трёхслойной структуре имеются два p-n перехода.

Термин «биполярные» подчеркивает то, что у таких транзисторов используется оба типа носителей зарядов (электроны и дырки).

Существует два типа транзисторов:

1. С прямой проводимостью (p-n-p)
2. С обратной проводимостью (n-p-n)



Э-Б – эмиттерный переход.
Б-К – коллекторный переход.

Крайние слои называются эмиттером и коллектором.
Между ними – база.

Особенности конструкции:

1. Толщина базы должна быть малой по сравнению с длиной свободного пробега носителей зарядов (примерно 20-30 мкм).
2. Концентрация примесей и основных носителей в эмиттере должна быть много больше, чем в базе.

Так для р-п-р транзистора должны соблюдаться условия :

$$N_a \gg N_d, p_p \gg n_n.$$

Здесь N_a – концентрация акцепторной примеси,

N_d – концентрация донорной примеси,

p_p – концентрация дырок, n_n – концентрация электронов.

Эмиттерный переход смещен в прямом направлении, коллекторный в обратном.

Схемы с общим эмиттером (ОЭ):

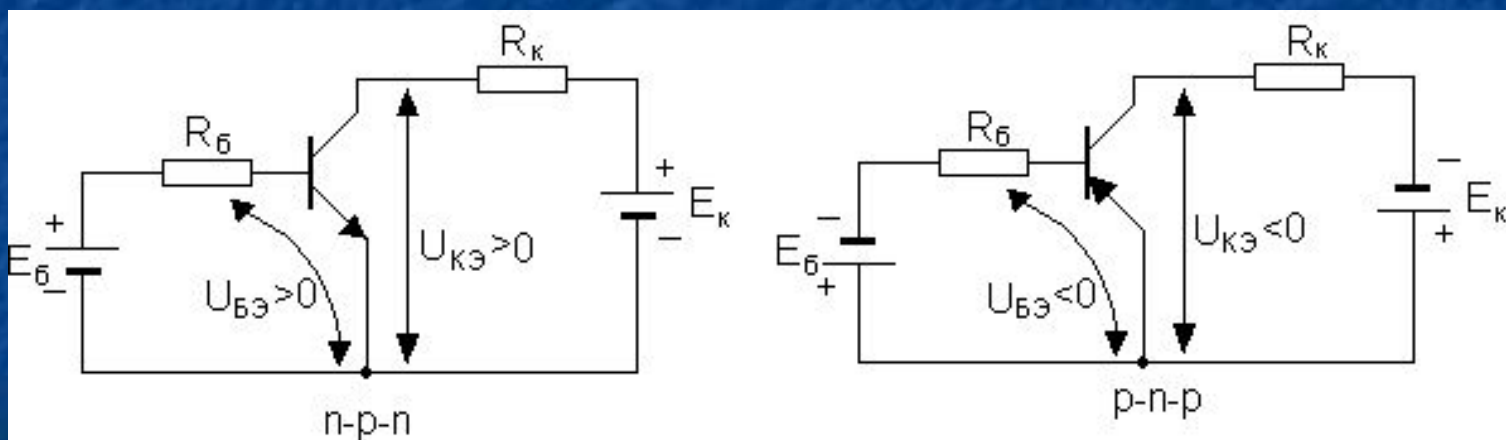
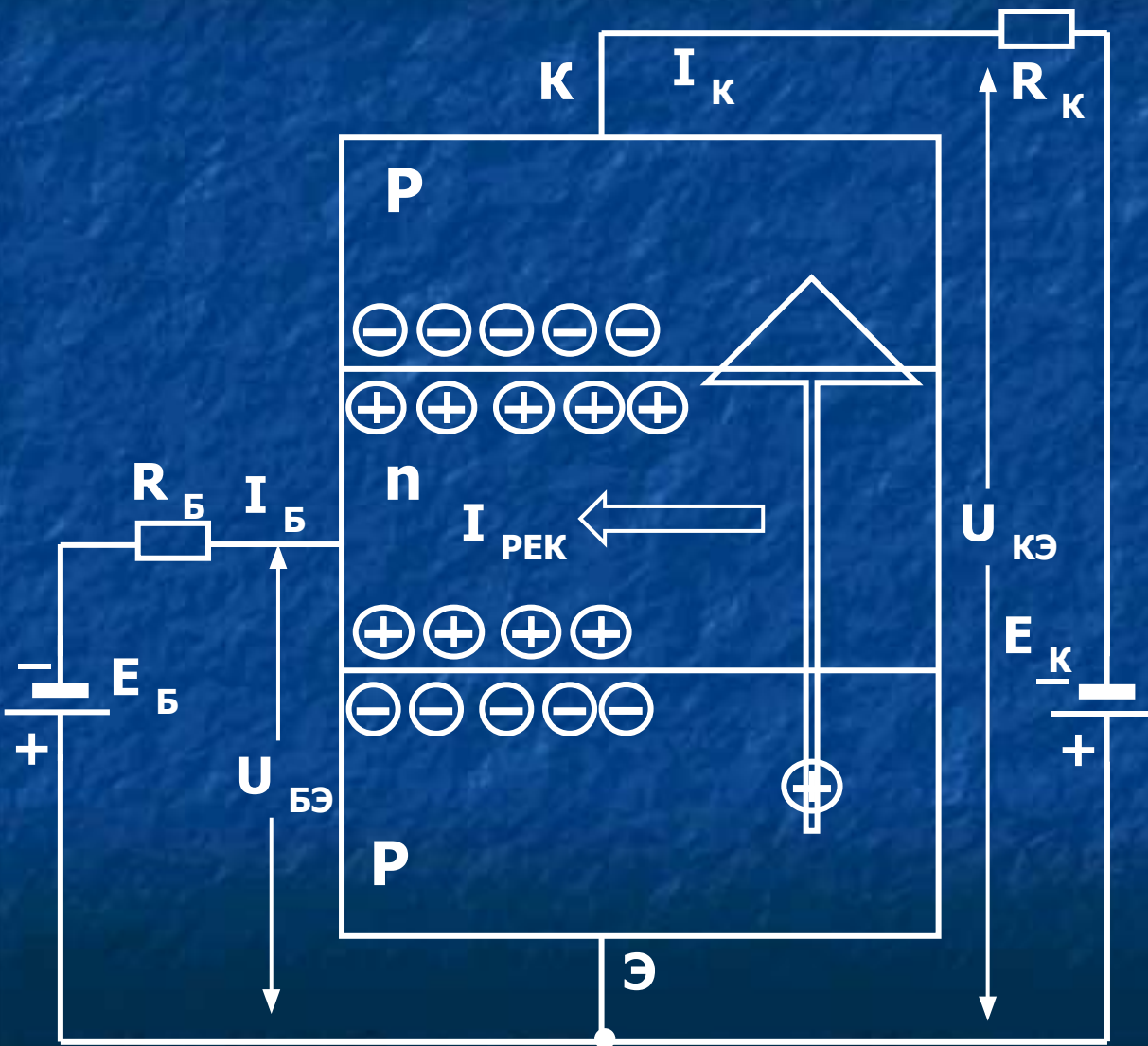


Схема с общим эмиттером называется так потому, что входная и выходная цепь имеют общую точку на эмиттере.

Принцип действия транзистора

Рассмотрим на примере р-п-р транзистора.



При $U_{БЭ} = 0$ и $U_{КЭ} = 0$ происходит диффузия дырок из эмиттера в базу, т.к. концентрация дырок в эмиттере много больше, чем электронов в базе. Перейдя под действием сил диффузии металлургическую границу, дырки рекомбинируют с основными носителями базы. Рекомбинация – это встреча электронов с дырками.

Рекомбинация – это встреча электронов с дырками. При этом происходит возврат электронов из зоны проводимости в валентную зону. Также исчезают свободные заряды.

За счет ухода основных носителей из одного слоя и их рекомбинации в другом, вблизи металлургической границы возникает область, обеднённая подвижными носителями заряда и имеющая высокое сопротивление (запирающий слой).

В запирающем слое нарушается баланс положительных и отрицательных зарядов, т.к. при уменьшении концентрации подвижных носителей оказывается нескомпенсированным объёмный заряд неподвижных ионов примесей : в p-слое – отрицательных, а в n- слое – положительных ионов.

Этот двойной электрический слой создает электрическое поле с напряженностью E_0 , и возникает потенциальный барьер ϕ_0 .

Электрическое поле, возникшее внутри запирающего слоя, вызывает направленное движение носителей через переход – дрейфовый ток, направленный навстречу току диффузии через переход.

Диффузия носителей приводит к росту электрического поля и потенциального барьера, при этом растет дрейфовый ток.

Рост двойного электрического слоя прекращается тогда, когда суммарный ток через переход равен нулю, т.е.

$$I_{\text{диф}} = - I_{\text{дрейфа}}$$

Такой режим соответствует равновесному состоянию р – n перехода.

Включим источники ЭДС E_K и E_B .

$$U_{KЭ} > U_{БЭ} \quad U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$$

Потенциальный барьер на эмиттерном переходе уменьшится, так как полярность приложенного к нему напряжения – прямая \Rightarrow ток диффузии через эмиттерный переход увеличится.

На коллекторном переходе полярность обратная \Rightarrow потенциальный барьер коллекторного перехода увеличится.

Т.к. база тонкая, почти все дырки подойдут к коллекторному переходу, не попадая в центры рекомбинаций.

Центры рекомбинаций – это дефекты кристаллической решетки (нарушения кристаллической структуры, случайные примеси, трещины, дефекты в поверхностных слоях).

Центры рекомбинаций – это дефекты кристаллической решетки (нарушения кристаллической структуры, случайные примеси, трещины, дефекты в поверхностных слоях).

Дырки, подошедшие к коллекторному переходу будут втягиваться в коллектор (так как напряженность электрического поля коллекторного перехода будет «втягивающей» для неосновных носителей – дырок в базе n – типа).

Ток дырок, попавших из эмиттера в коллектор будет замыкаться через внешнюю цепь.

При этом приращение тока эмиттера $\Delta I_{\text{э}}$ вызовет приращение тока коллектора $\Delta I_{\text{к}}$.

$$\Delta I_{\text{к}} = \alpha \cdot \Delta I_{\text{э}} \quad \text{здесь} \quad \alpha = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}$$

α – коэффициент передачи тока эмиттера. $\alpha = 0,9-0,99$.

$\alpha < 1$, т.к. небольшая часть дырок из эмиттера всё же рекомбинирует с электронами в базе.

База была электрически нейтральна, т.к. избыточный заряд подвижных носителей – электронов компенсировался зарядом положительных неподвижных ионов примесей.

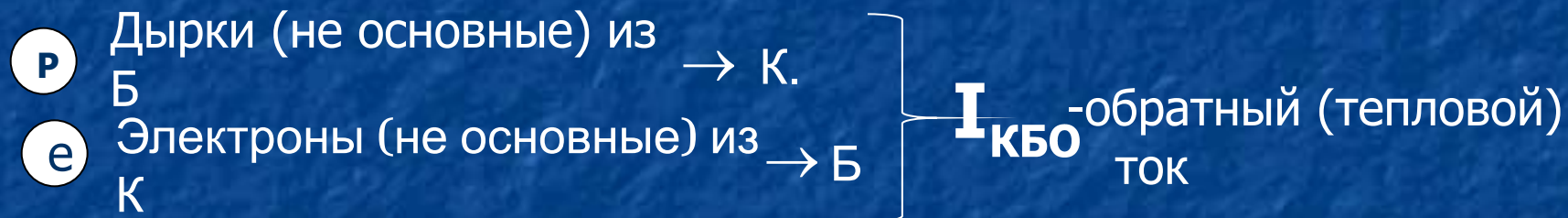
Т.к. небольшая часть дырок из эмиттера всё же рекомбинирует с электронами в базе, нейтральность базы нарушится и для её восстановления из внешней цепи за счет $U_{БЭ}$ будут поступать электроны.

$$I_B = I_{\text{реком.}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} - \alpha I_{\text{Э}} = (1 - \alpha) I_{\text{Э}}$$

Основные соотношения между токами в транзисторе.

$$\Delta I_K = \alpha \cdot \Delta I_{\text{Э}} \quad \alpha = 0,9 \div 0,99$$

Через коллекторный переход кроме движения основных носителей есть ещё движение неосновных носителей. Этот ток мал.



Полный ток через коллекторный переход, обусловленный и основными и неосновными носителями :

$$I_K = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБО}} \quad (1)$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_K = I_{\text{Э}} - \alpha I_{\text{Э}} - I_{\text{КБО}} = (1 - \alpha) I_{\text{Э}} - I_{\text{КБО}} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) показывают, что токи в транзисторе связаны линейно.

Как связаны I_K и I_B ?

Из (2) $\Rightarrow I_{\text{Э}} = \frac{I_B + I_{\text{КБО}}}{1-\alpha}$ (3); (3) подставляем в (1)

$$I_K = \alpha \cdot \frac{I_B + I_{\text{КБО}}}{1-\alpha} + I_{\text{КБО}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot I_B + \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot I_{\text{КБО}} + I_{\text{КБО}} \quad (4)$$

Обозначим β – коэффициент передачи тока базы.

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{(1)}{(2)} = \frac{\alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{\text{КБО}}}{(1-\alpha) \cdot I_{\text{Э}} - I_{\text{КБО}}} \approx \frac{\alpha}{1-\alpha};$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

Далее (4) можно преобразовать :

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_K &= \beta \cdot \mathbf{I}_B + \beta \mathbf{I}_{КБ\text{О}} + \mathbf{I}_{КБ\text{О}} = \beta \cdot \mathbf{I}_B + (1 + \beta) \cdot \mathbf{I}_{КБ\text{О}} = \\ &= \beta \cdot \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_{КЭ\text{О}} \approx \beta \cdot \mathbf{I}_B, \quad \text{т.к. } \mathbf{I}_{КЭ\text{О}} \text{ мал} \end{aligned} \quad (5);$$

А так как $\mathbf{I}_Э = \mathbf{I}_K + \mathbf{I}_B = \beta \cdot \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_B = (1 + \beta) \cdot \mathbf{I}_B$;

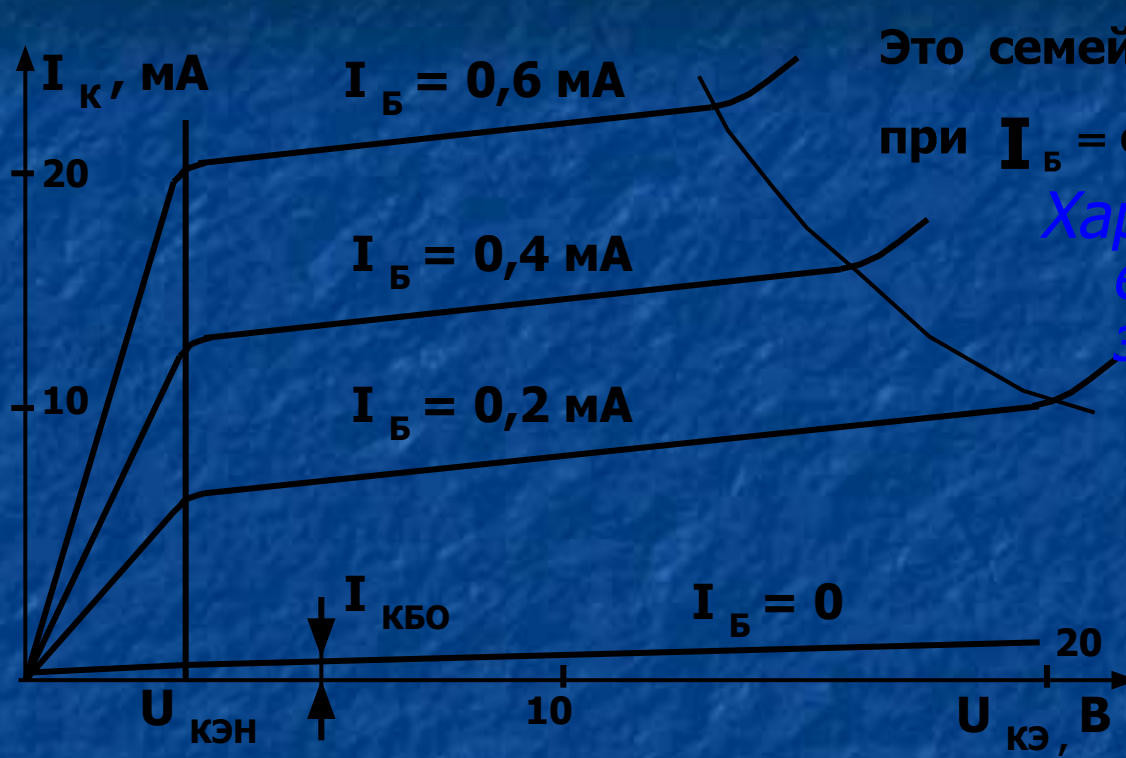
В итоге получим :

$$\mathbf{I}_K = \beta \cdot \mathbf{I}_B$$

$$\mathbf{I}_Э = (1 + \beta) \cdot \mathbf{I}_B$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ.

Выходная (коллекторная) характеристика.



Это семейство кривых $I_K = f(U_{КЭ})$
при $I_B = \text{const}$

Характеристика снимается по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

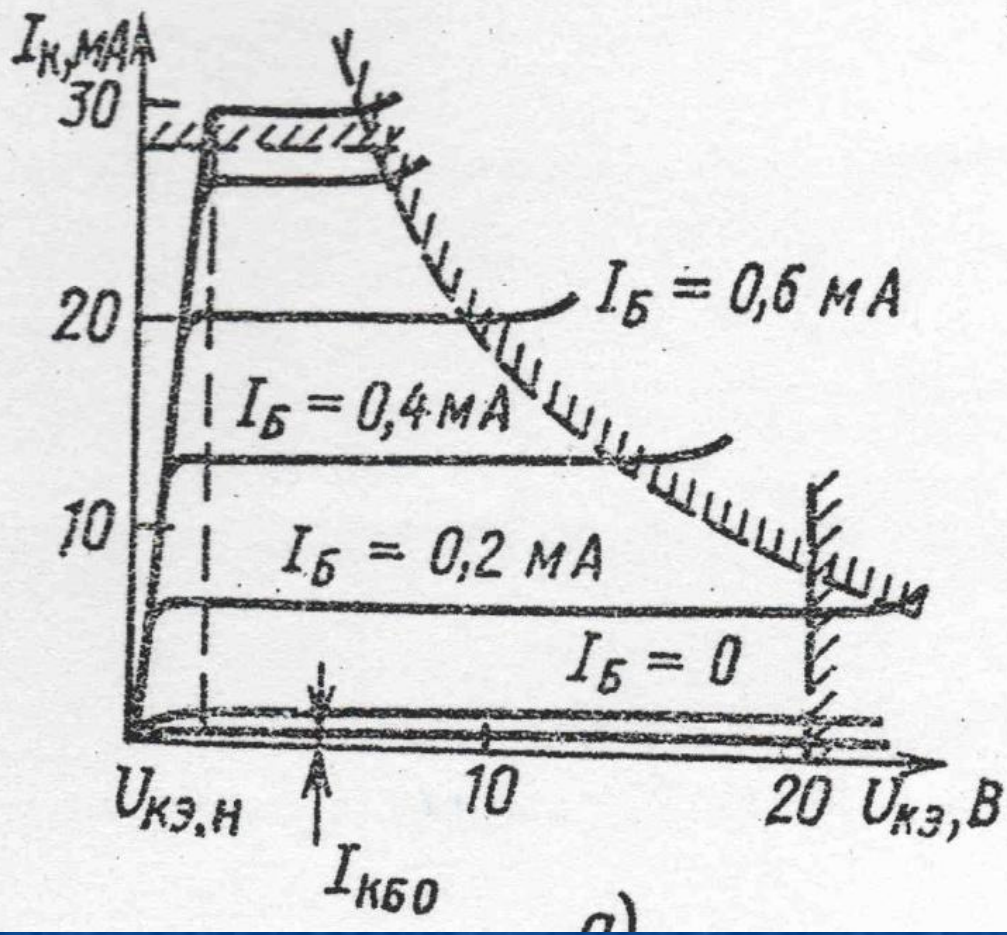
Х – ка имеет три участка.

При $U_{КЭ} > U_{КЭН}$ – пологий участок.

I_K почти не зависит от $U_{КЭ}$.

Для идеального транзистора пологий участок имеет вид горизонтальной линии.

При этом на переходе Э-Б прямое напряжение, на переходе Б-К – обратное.



На пологом участке справедливо уравнение (5) :

$$\mathbf{I}_K = \beta \cdot \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_{KЭ0} \approx \mathbf{h}_{21Э} \cdot \mathbf{I}_B ;$$

На пологом участке транзистор работает как управляемый источник тока I_K , которым можно управлять, изменяя I_B .

Т.е. I_K не зависит от нагрузки.

Если при $I_K = const$ изменяется $R_{нагр}$, то будет изменяться $I_K \cdot R_{нагр}$, т.е. изменяется $U_{КЭ}$.

Чтобы увеличить I_B , надо увеличить $U_{БЭ}$. При этом увеличится прямое напряжение на эмиттерном переходе, диффузия носителей из Э в Б и $I_Э$ увеличится на $\Delta I_Э$.

Увеличение I_B происходит из-за увеличения рекомбинаций согласно уравнению (2) :

$$\Delta \mathbf{I}_B = \Delta \mathbf{I}_{рек} = \Delta \mathbf{I}_Э \cdot (\mathbf{1} + \alpha)$$

Основная часть приращения тока эмиттера $\alpha \cdot \Delta I_{\text{Э}}$ вызывает приращение $\Delta I_{\text{К}}$:

$$\Delta I_{\text{К}} = \alpha \cdot \Delta I_{\text{Э}} = \beta \cdot \Delta I_{\text{Б}} ;$$

Небольшой наклон пологого участка объясняется так :

При увеличении $U_{\text{КЭ}}$ растёт напряжение на коллекторном переходе, расширяется двойной электрический слой, т.к. увел. ϕ_0 (потенциальный барьер) , а значит, увел. объёмный заряд и увел. ширина двойного эл. слоя.

Т.о. эффективная ширина базы уменьшается.

В более тонкой базе уменьш. вероятность рекомбинаций, следовательно увел. коэффициент β .

Из-за этого увел. $I_{\text{К}}$.

На пологом участке транзистор работает в усилительном режиме.

Крутой участок :

Напряжение на коллекторном переходе определяется уравнением :

$$U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$$

При уменьш. $U_{КЭ}$ будет уменьш. $U_{КБ}$ и при $U_{КЭ} = U_{КЭН} = U_{БЭ}$ напряжение $U_{КБ}$ изменит знак.

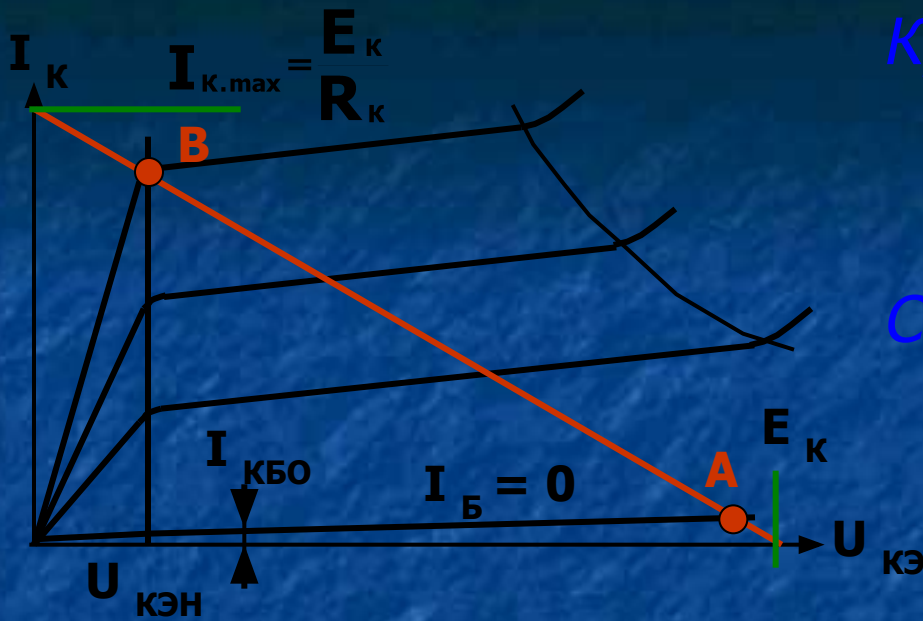
$U_{КЭН} = (0,2 \div 1) В \approx 0$ - напряжение коллектор – эмиттер насыщения.

При дальнейшем уменьш. $U_{КЭ}$ к коллекторному переходу будет приложено прямое напряжение.

Навстречу току дырок из Э в К начинается встречное движение основных носителей (дырок) из К в Б.

В результате $I_{К}$ резко падает.

При этом теряются усилительные свойства, транзистор переходит из усилительного режима в ключевой режим (состояние насыщения).

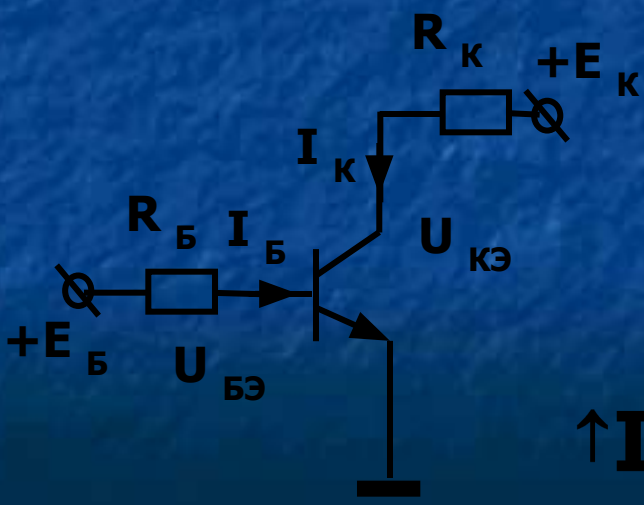
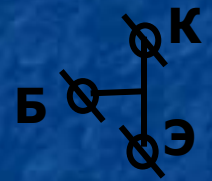


Крутой участок используется в импульсной технике для реализации «ключевого режима» транзистора.

Состоянию насыщения соответствует точка B на выходной характеристике.

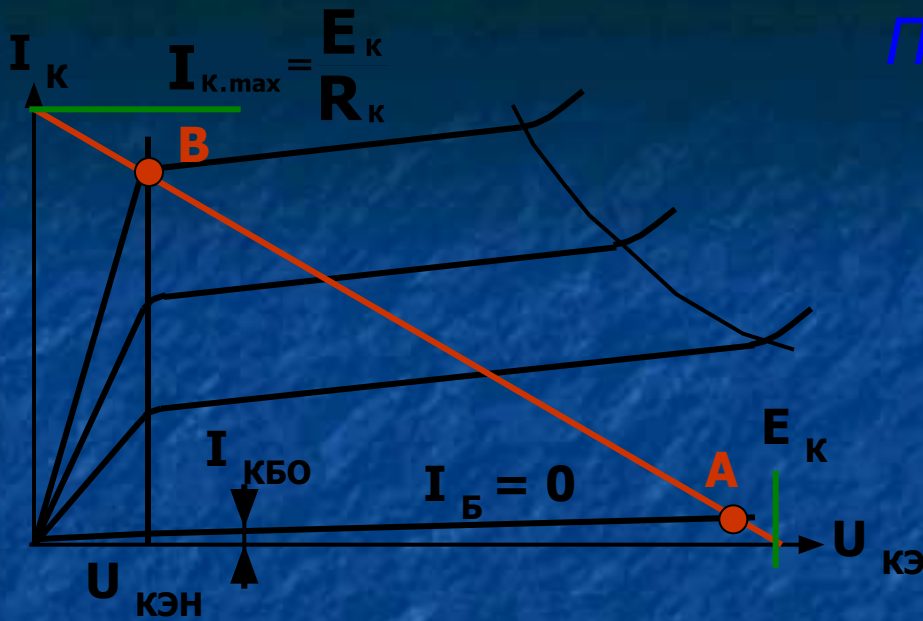
В состоянии насыщения транзистор можно пред-

ставить как замкнутый ключ. Или говорят, что транзистор «стянут в точку».



На практике резкого уменьшения I_K в режиме насыщения не происходит, т.к. E_K не отключается. А вводят VT в режим насыщения путём увел. I_B .

$$\uparrow I_B \rightarrow \uparrow I_K \rightarrow \uparrow I_K \cdot R_K \rightarrow \downarrow U_{КЭ}; \quad U_{КЭ} \approx 0;$$



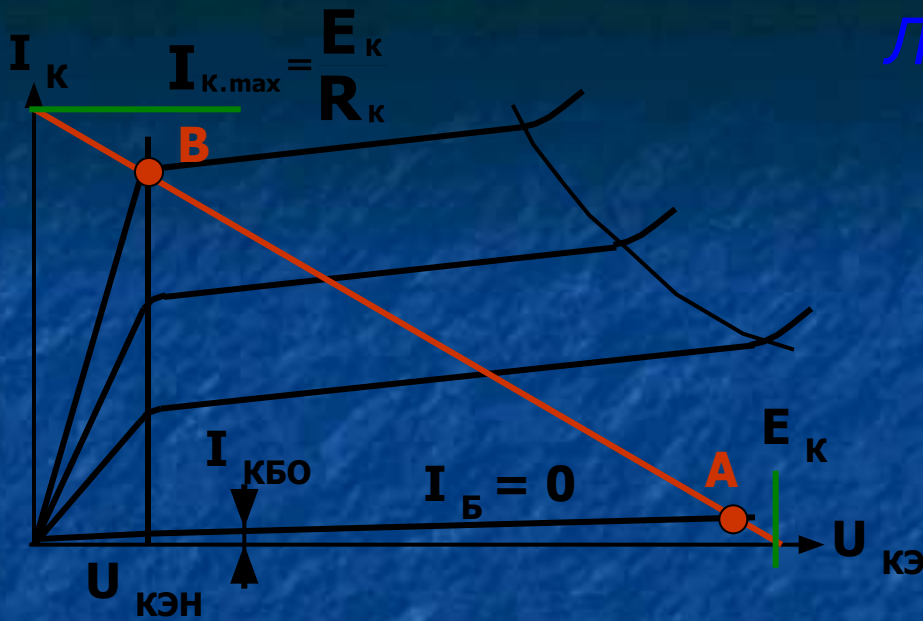
При работе в т. В в режиме насыщения будет $I_{К.МАХ}$ и $U_{КЭН} \approx 0$.

$$I_{К.маx} = \frac{E_K}{R_K}$$

В т. А транзистор находится в режиме «отсечки». VT закрыт.

Его можно представить как разомкнутый ключ. При этом $I_{К,MIN} = I_{КБО} \approx 0$, $U_{КЭ,МАХ} = E_K$.

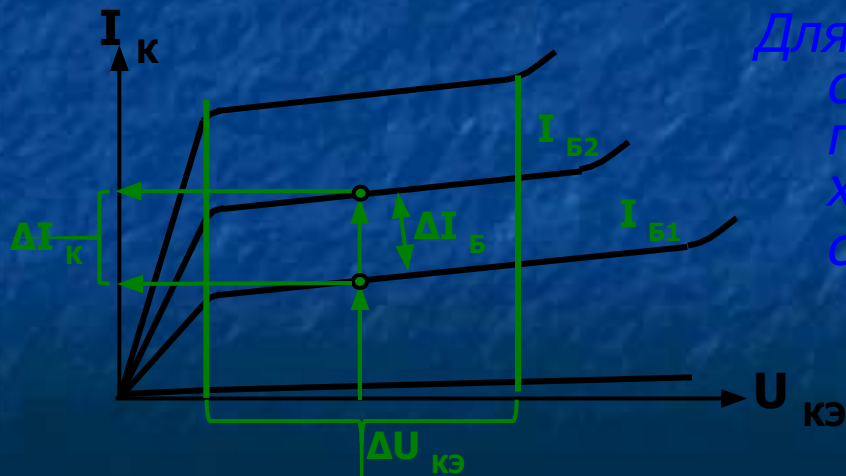
При значительных $U_{КЭ}$ происходит лавинное размножение носителей зарядов и, далее, может произойти тепловой пробой. Этот участок в правой части характеристики имеет увеличение I_K (загиб характеристики вверх). Показано ограничение рабочего участка пунктирной линией.



Линия АВ называется линией нагрузки по постоянному току. С её помощью можно проводить графический анализ режима работы транзистора.

Часто в технической литературе основные характеристики транзистора приводят в виде так называемых h – параметров. Их можно найти из выходной и входной характеристик транзистора.

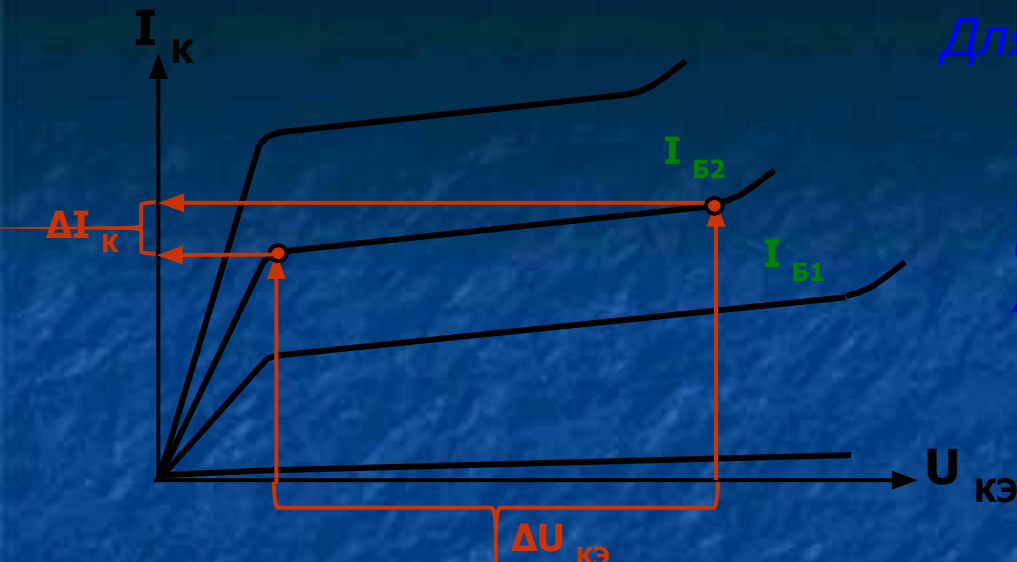
Их можно найти из выходной и входной характеристик транзистора.



Для нахождения $h_{21Э}$ примерно из середины линейного диапазона $\Delta U_{КЭ}$ проводим вертикаль до пересечения с характеристиками. Точки пересечения сносим на ось I_K и находим ΔI_K .

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \Big|_{U_{КЭ} = \text{const}} = \beta ;$$

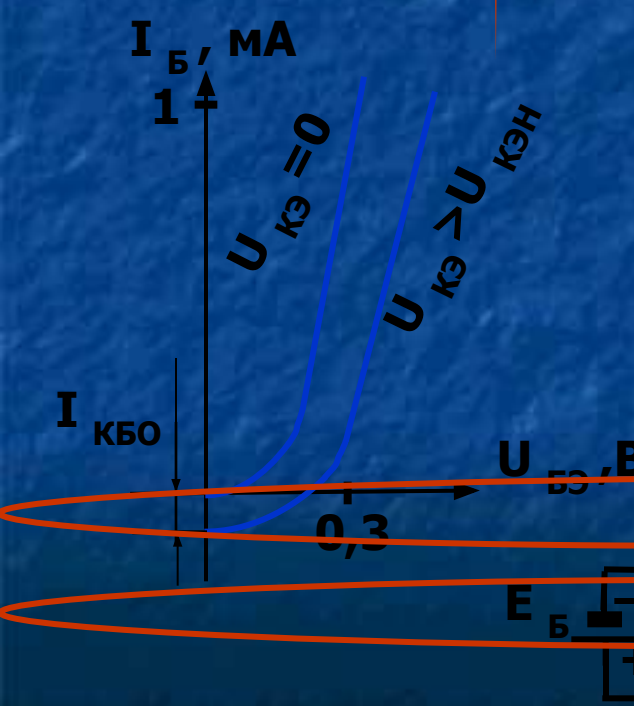
Не надо забывать, что размерность I_B – микроамперы, а I_K – миллиамперы.



Для нахождения $h_{22Э}$ для одной из кривых семейства на линейном (наклонном) усилительном участке находим приращения $\Delta U_{КЭ}$ и соответствующие им приращения $\Delta I_{К}$.

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \Big|_{I_{Б} = \text{const}} = \frac{1}{R_{ВЫХ}} ;$$

Входная (базовая) характеристика.

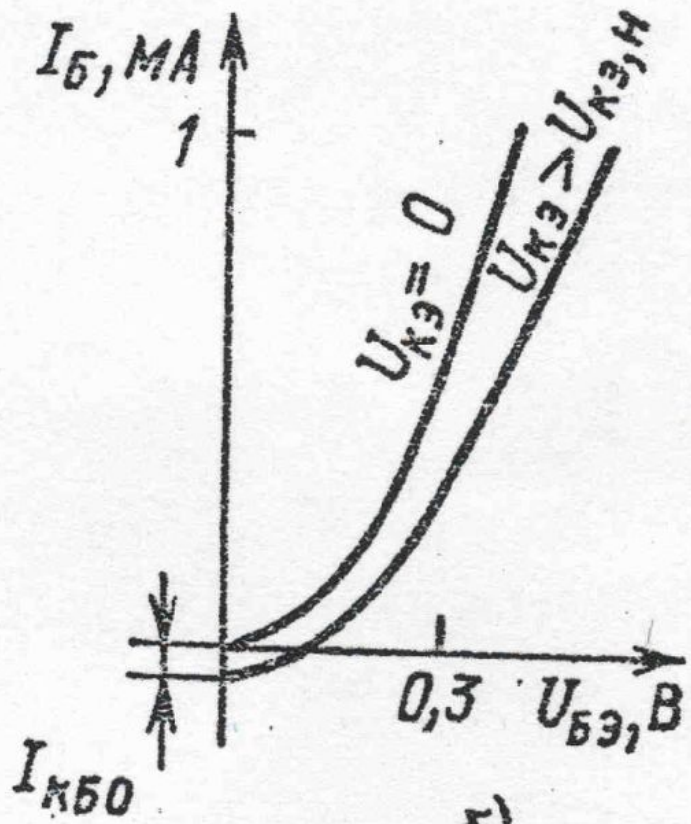


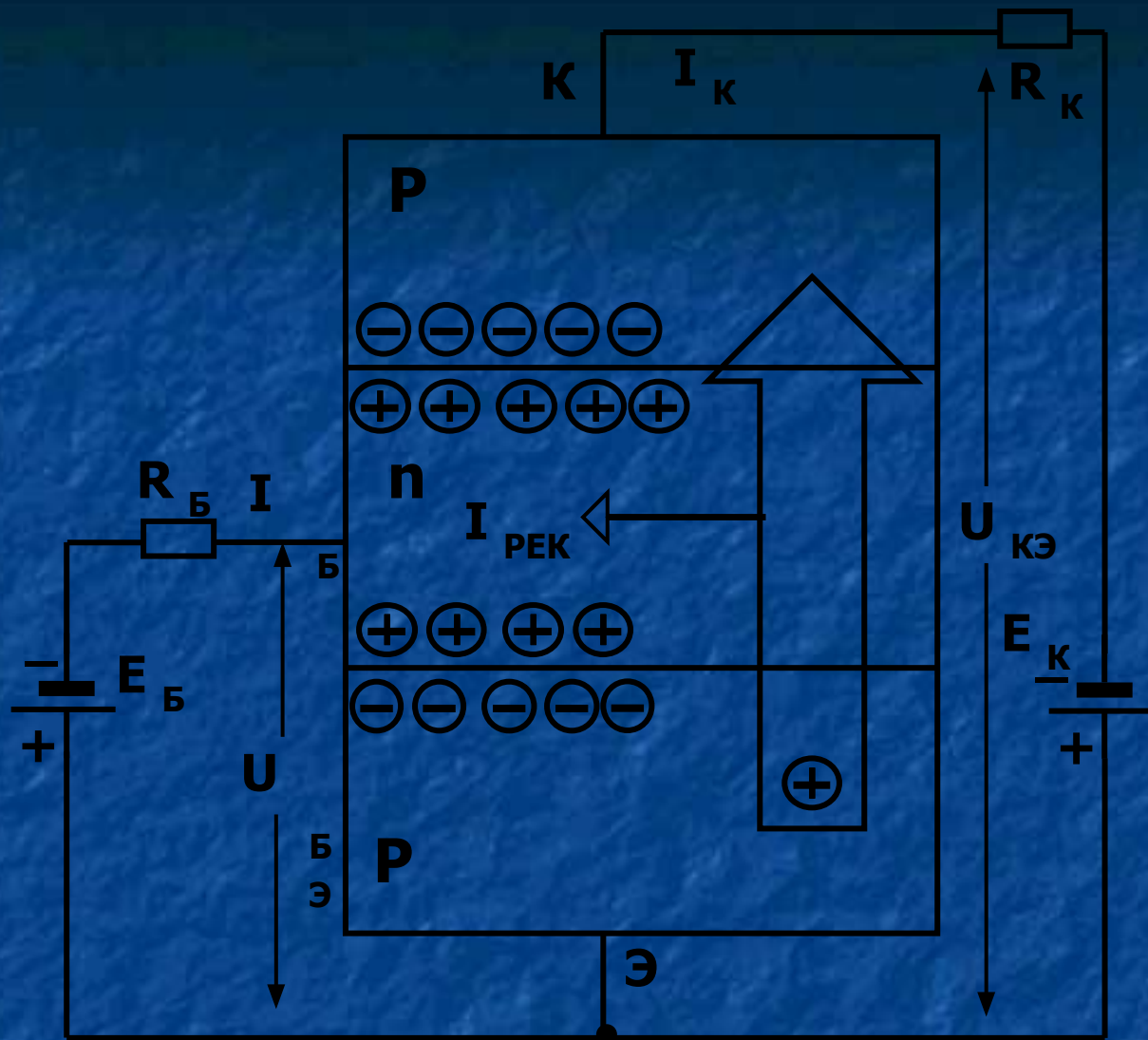
Это семейство характеристик $I_{Б} = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$.

При $U_{КЭ} = 0$ оба перехода работают при прямом напряжении, т.к. на базе минус от $U_{БЭ}$ (транзистор p-n-p типа), а на коллекторе 0, т.е. 0 «положительнее» минуса.

$I_{Э}$ и $I_{К}$ суммируются в базе. Т.е. $I_{Б}$ больше, чем при $U_{КЭ} > U_{КЭн}$.

Входная характеристика при этом есть ВАХ двух p-n переходов, включенных параллельно (одно напряжение, а ток больше).





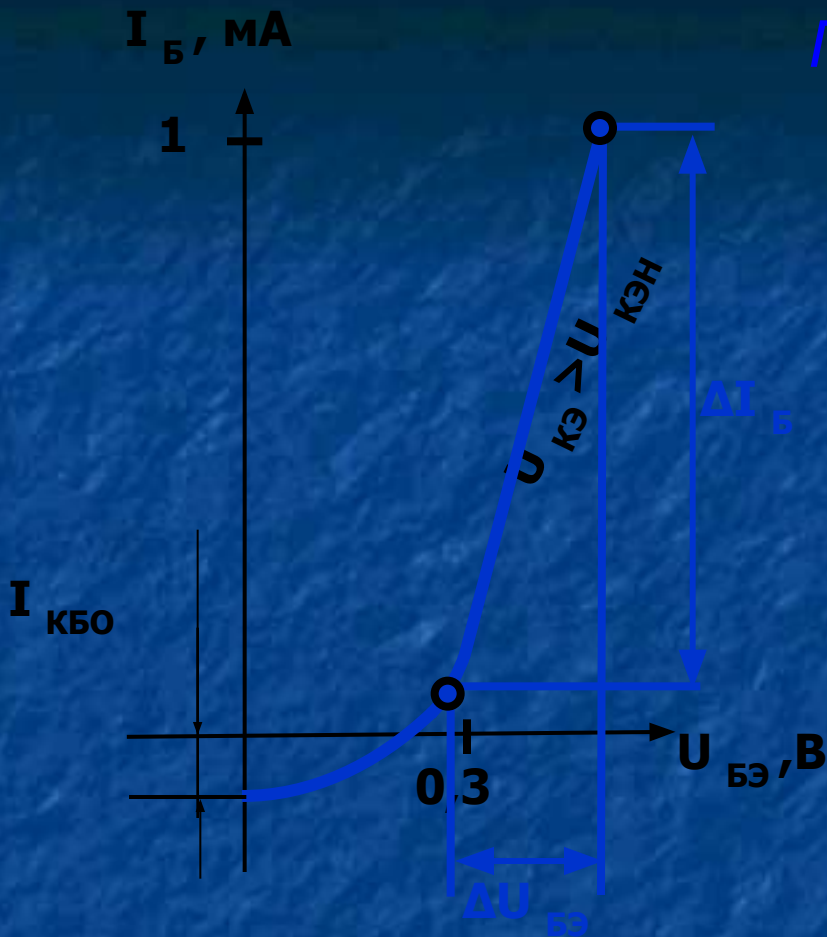
$$U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$$

При $U_{КЭ} > U_{КЭН}$ на коллекторном переходе обратное напряжение, на эмиттерном – прямое.

$$I_B = I_E - I_K$$

I_B уменьшен на коэффициент $(\alpha-1)$ по сравнению с ВАХ эмиттерного перехода.

Входная характеристика – есть прямая ветвь ВАХ эмиттерного перехода, но ток уменьшен на $(\alpha-1)$. Этим показывается, что I_B – лишь часть I_E .



По входной характеристике транзистора можно определить ещё один параметр транзистора :

r_B – входное динамическое сопротивление транзистора.

$$r_B = h_{11Э} ;$$

$$r_B = h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} ;$$

$r_B \approx 50 \div 200$ Ом. Среднее значение $r_B \approx 100$ Ом.