

Центр инженерной подготовки

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 1

Юдинцев Антон Геннадьевич, к.т.н.

<https://vk.com/id436438364>

yudintsev-anton@mail.ru

Список рекомендуемой литературы

- 1) Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник/ Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк: учебник / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.: ил.
- 2) Петрович В.П., Воронина Н.А., Глазачев А.В. Силовые преобразователи электрической энергии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 240 с.
- 3) Попков О.З. Основы преобразовательной техники : учеб. пособие для вузов / О.З. Попков. 3-е изд., стереот. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.: ил.
- 4) Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – Москва: «Техносфера», 2006. – 632 с.: ил.
- 5) Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников – москва: «Техносфера», 2011.
- 6) Семёнов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. Изд. Солон-р. М.: 2001.
- 7) Семёнов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 416 с.: ил.
- 8) Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд-во ДОДЕКА, 2005. – 384 с.

Роль и место силовых преобразователей электрической энергии в современном мире

Ветроэнергети

ка



Ветроэнергетика является бурно развивающейся отраслью. К началу 2015 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 369 гигаВатт, к началу 2016 - 432 гигаВатт.

В 2014 году количество электрической энергии, произведённой всеми ветрогенераторами мира, составило 706 тераВатт-часов (3 % всей произведённой человечеством электрической энергии). Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику, в частности, на 2014 год в [Дании](#) с помощью ветрогенераторов производится 39 % всего электричества;

в [Португалии](#) — 27 %;

в [Никарагуа](#) — 21 %;

в [Испании](#) — 20 %;

в [Ирландии](#) — 19 %;

в [Германии](#) — 8 %;

в [ЕС](#) — 7,5 %.

В 2014 году 85 стран мира использовали ветроэнергетику на коммерческой основе.

! Без применения силовой преобразовательной техники невозможны создание и эксплуатация ветроустановок. Ветроэнергетика не может существовать без силовых преобразователей электрической энергии.

Современное сварочное оборудование



Сварочный инвертор

Современный сварочный аппарат – это силовой преобразователь электроэнергии, работающий на высокой частоте, с применением современных полупроводниковых приборов.

Источники питания



Блоки питания
компьютеров



Промышленные источники питания



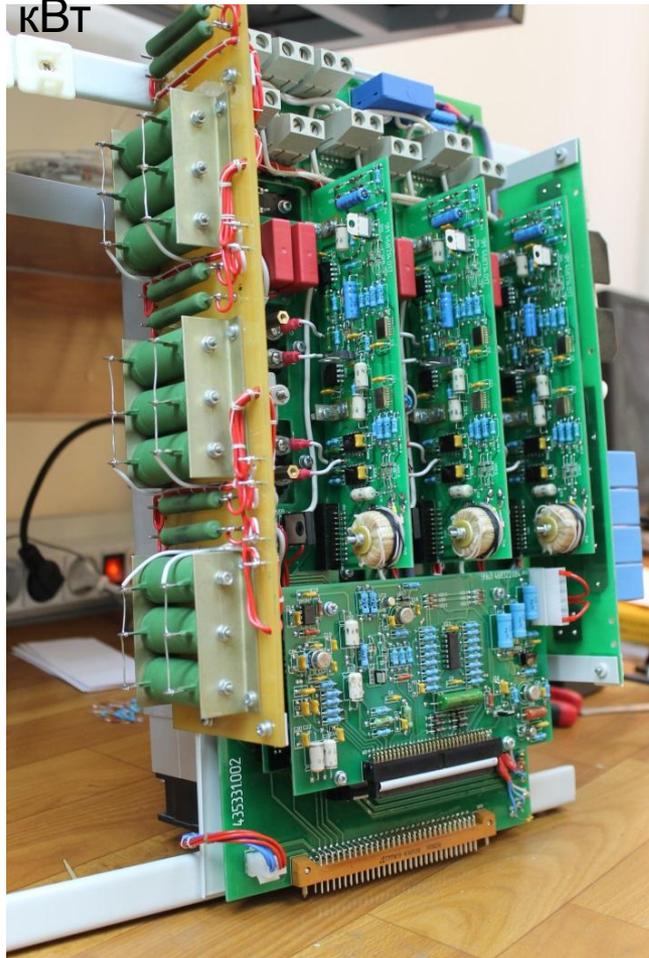
Лабораторные источники питания

- электропривод (регулирование скорости и момента вращения и др.);
- энергетика – Smart Grid (интеллектуальные энергетические сети);
- установки для электролиза (цветная металлургия, химическая промышленность);
- электрооборудование для передачи электроэнергии на большие расстояния на постоянном токе;
- электрометаллургическое оборудование (электромагнитное перемешивание металла и др.);
- электротермические установки (индукционный нагрев и др.);
- электрооборудование для обслуживания аккумуляторов;
- электрооборудование автономных объектов (автомобилей, самолетов и космических аппаратов);
- электрооборудование радиосвязи и телевидения;
- устройства для электроосвещения (питание люминесцентных и светодиодных светильников);
- медицинское электрооборудование (ультразвуковая терапия и хирургия и др.);
- электроинструмент и устройства бытовой электроники.

Силовая электроника – научно-техническая область изучающая управление потоками электроэнергии посредством мощных электронных приборов. Последние, как правило, работают в ключевых режимах, пропуская или блокируя поток электроэнергии, что позволяет, изменением алгоритмов их переключения, управлять усредненными значениями мгновенной мощности по требуемым законам.

Пример внешнего вида силовых преобразователей

3-х фазный инвертор, 10 кВт



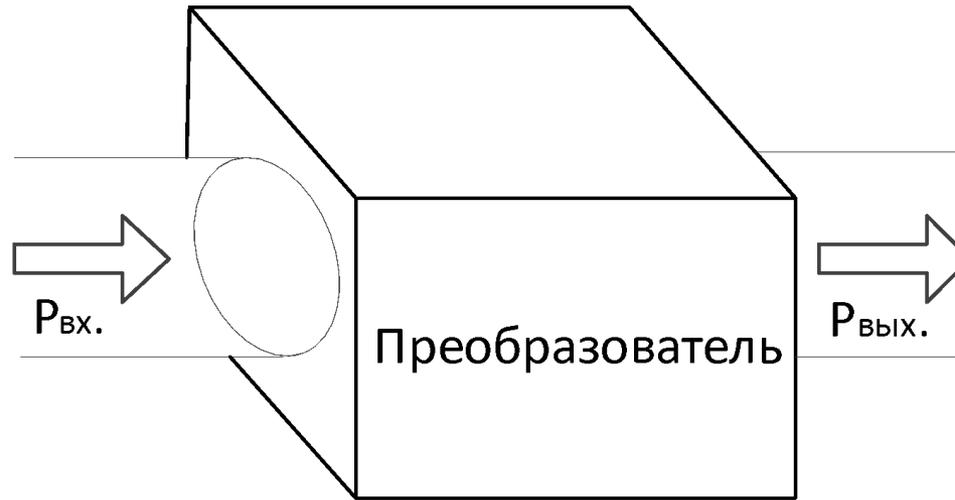
СЭП подводного аппарата, 30 кВт



Устройство питания



Основной целью разработки преобразователей энергии является создание силового преобразователя с малыми размерами и весом, преобразующего существенные объёмы энергии при высоком КПД.



КПД

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$$

Мощность потерь

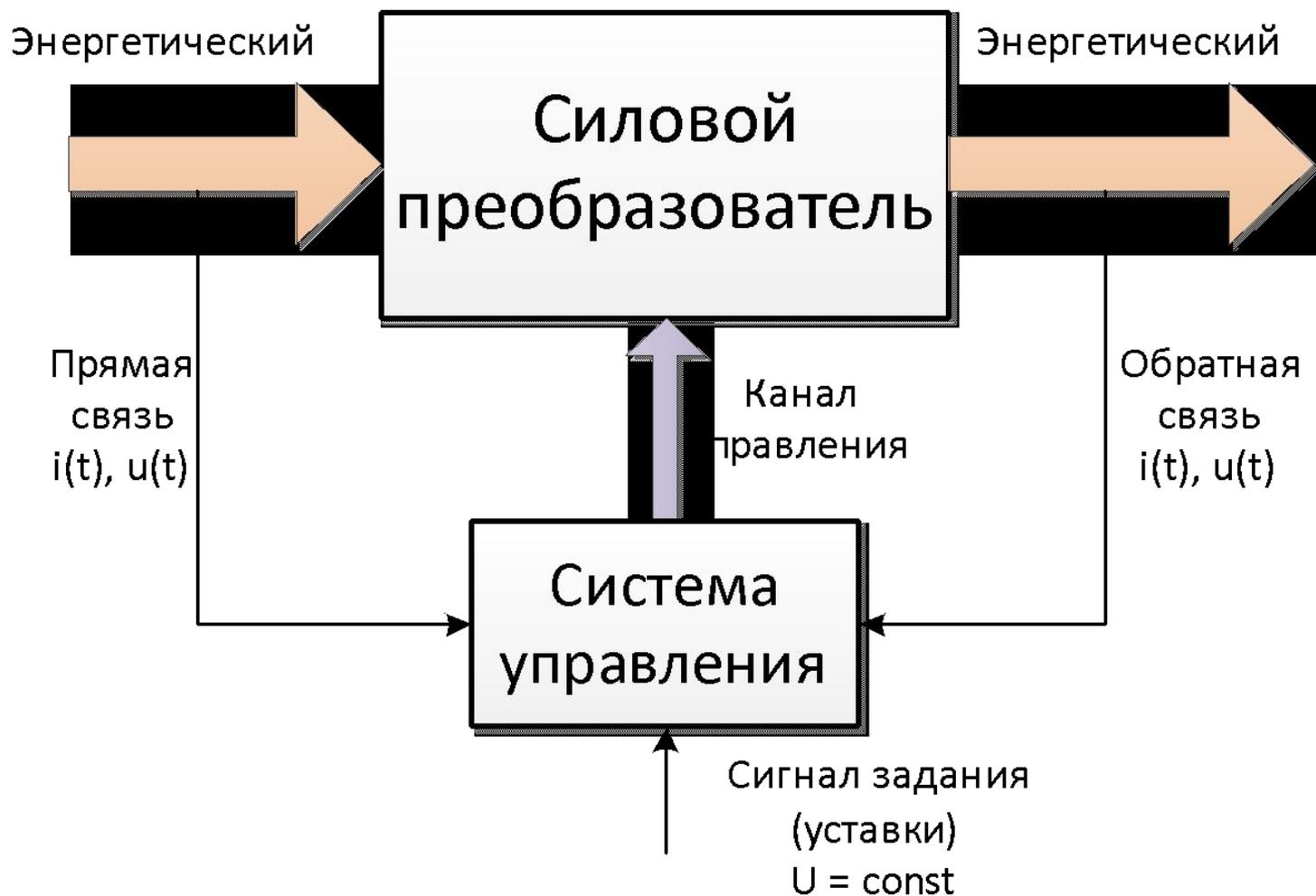
$$P_{\text{ПОТ.}} = P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

КПД является универсальной количественной оценкой эффективности, позволяющей оценить мощность потерь, габаритные размеры и надёжность преобразователя.

Обобщённая Т-образная схема замещения силового преобразователя

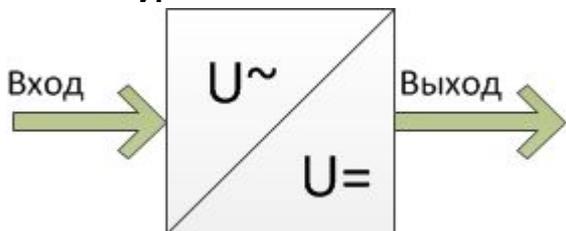


Для контроля выходных (входных) токов и/или напряжений необходимо наличие системы управления (СУ)

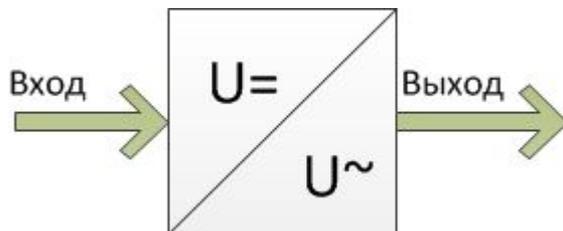


Основные виды устройств преобразовательной техники

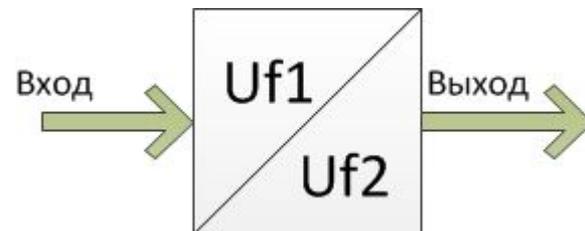
Выпрямитель
и



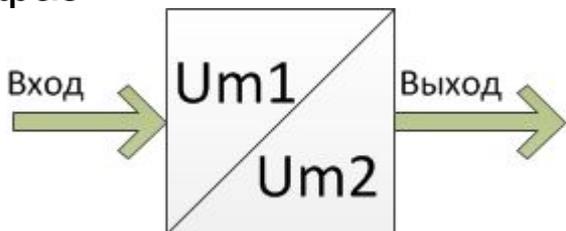
Инверторы



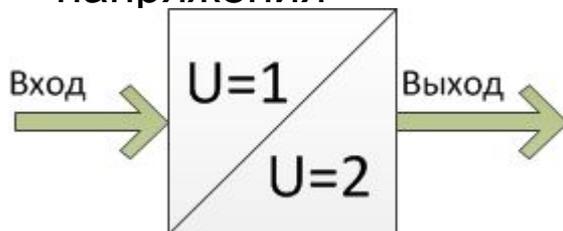
Преобразователи
частоты



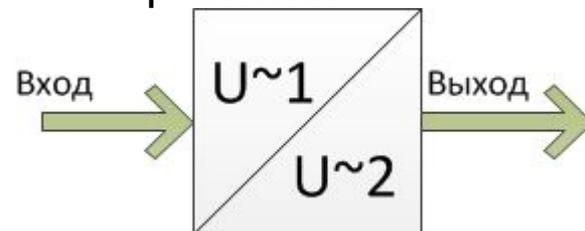
Преобразователи числа
фаз



Преобразователи
постоянного
напряжения



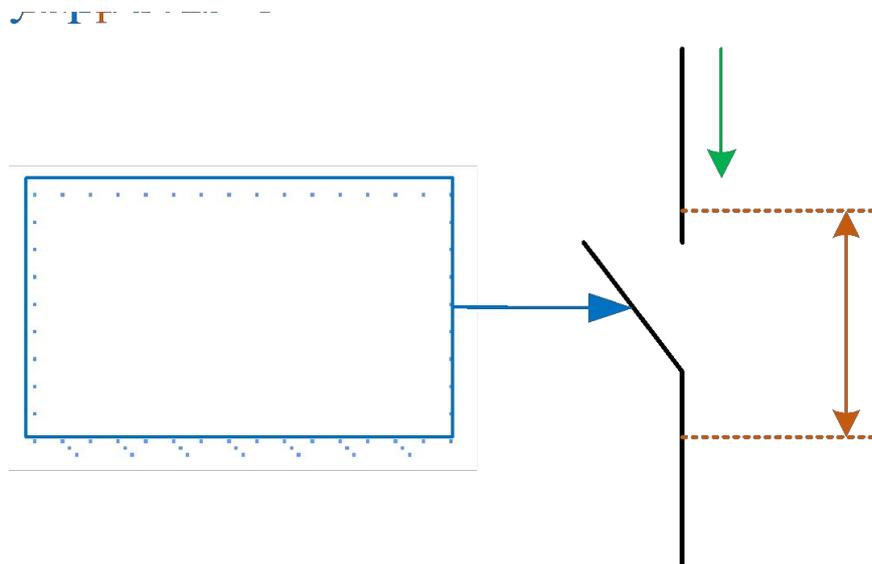
Регуляторы
переменного
напряжения



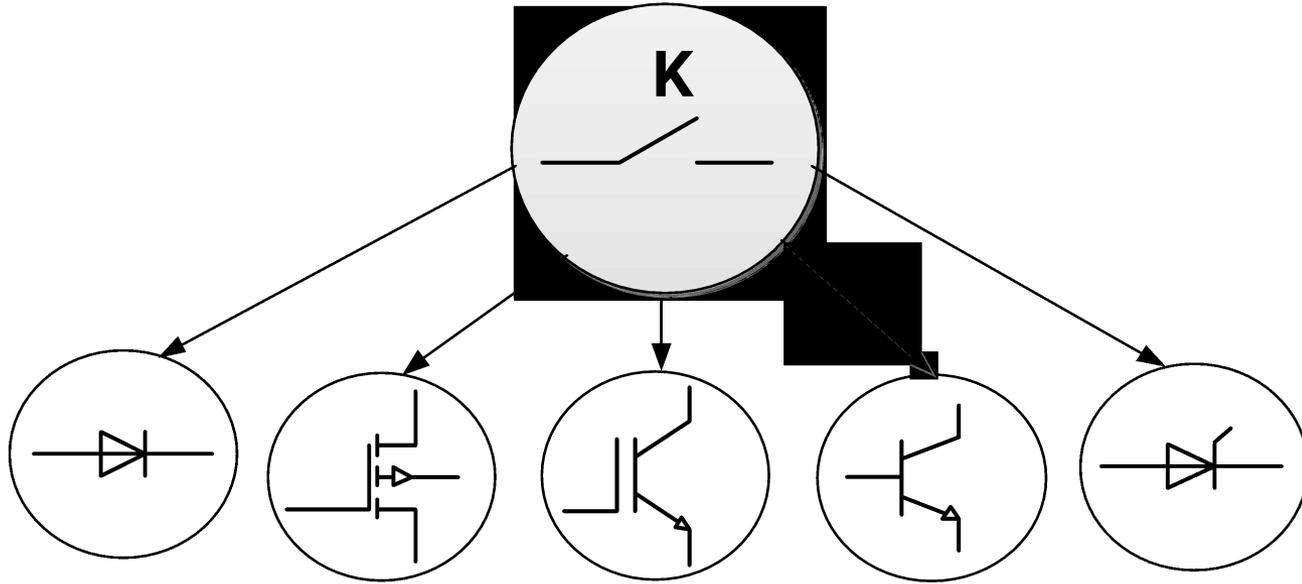
Электронным ключом называется устройство для замыкания и размыкания силовой электрической цепи, содержащее по крайней мере один управляемый вентиляльный прибор.

Вентильный прибор (вентиль) – электронный прибор, проводящий ток в одном направлении.

Понятие **«силовой»** означает, что осуществляется управление потоком электрической энергии, а не потоком информации.

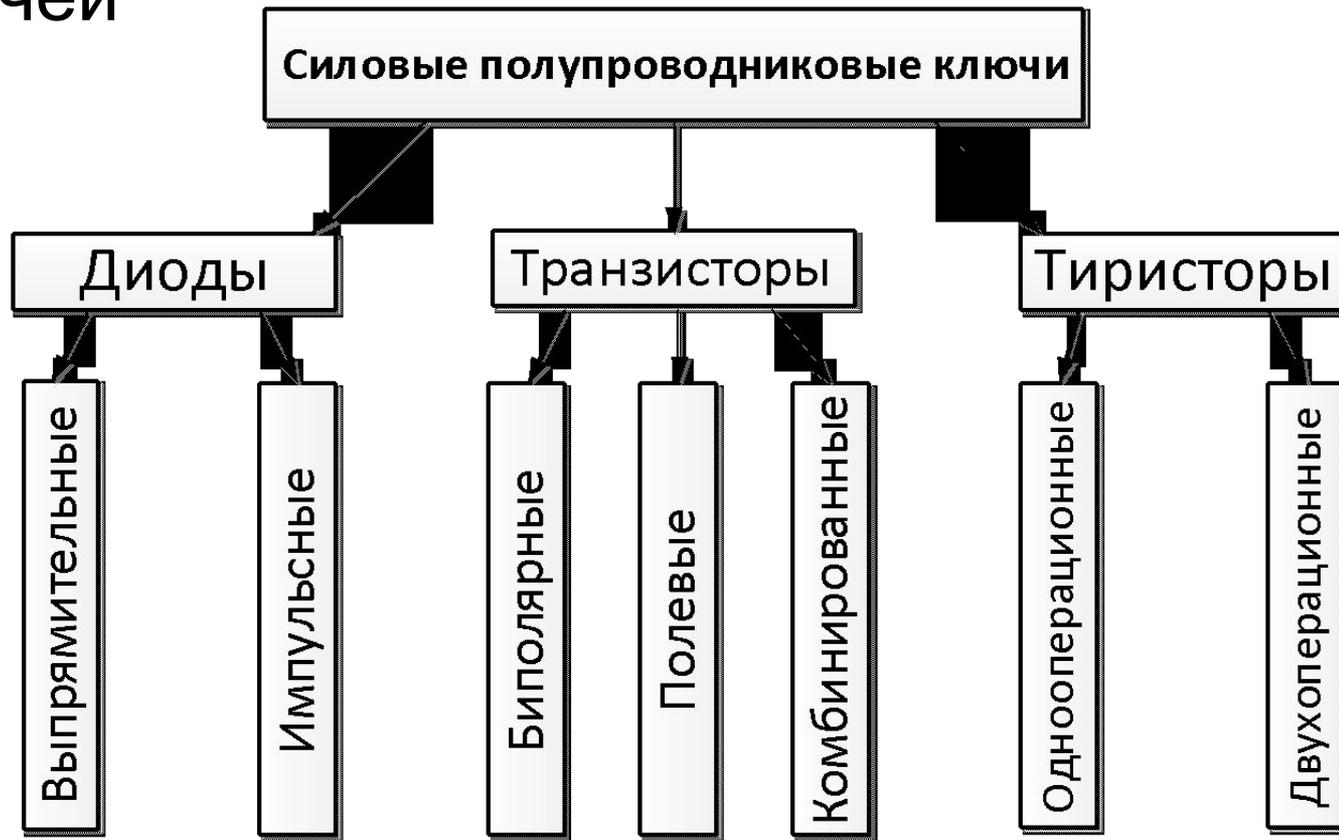


! Принцип работы любого преобразователя основан на периодическом включении и выключении силовых электронных ключей (вентилей).

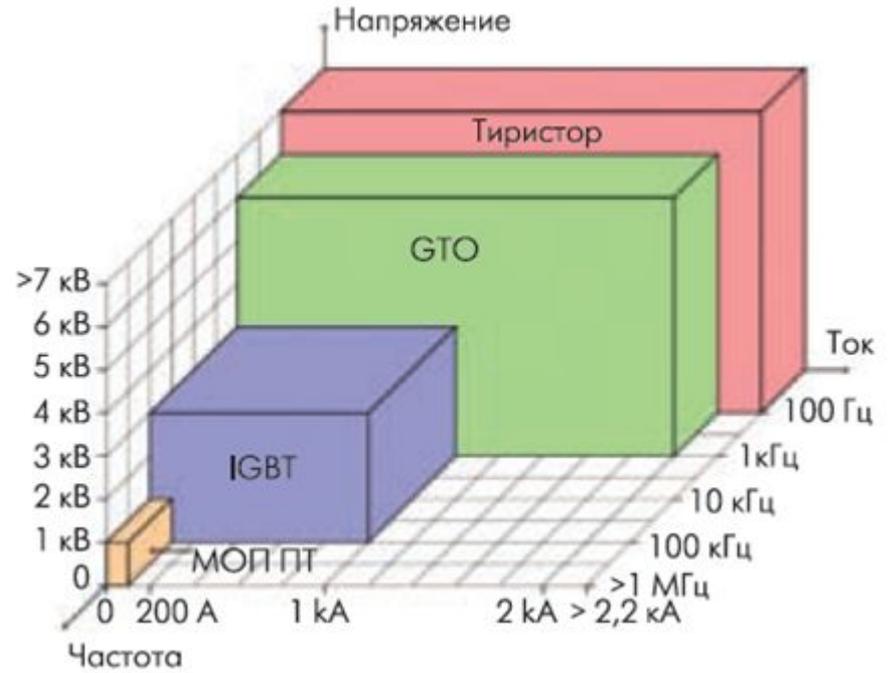
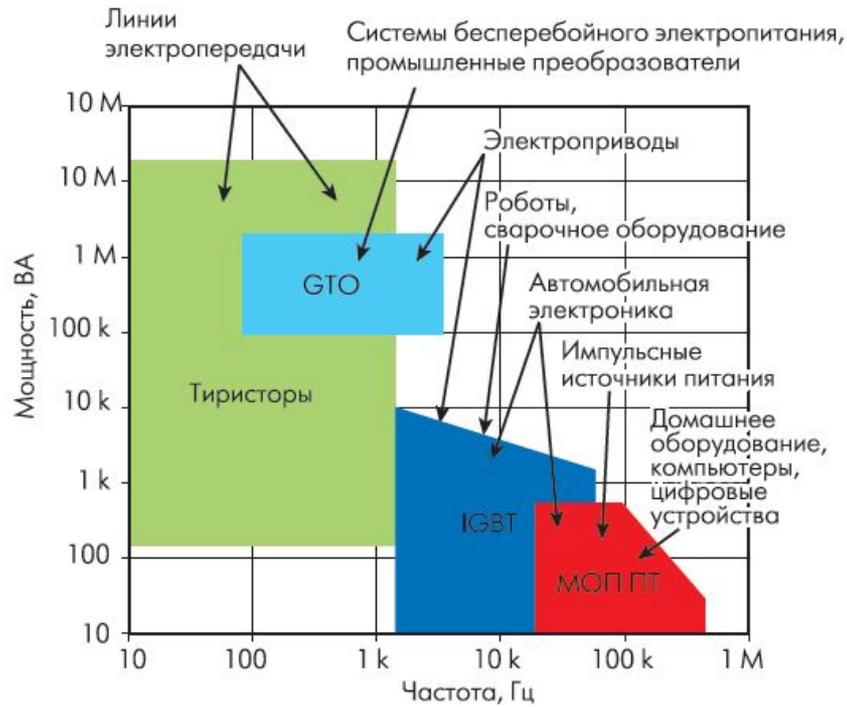


Тенденция развития элементной базы направлена на унификацию электронных ключей, уменьшение их установленной мощности, снижение потерь и уменьшение мощности управления.

Классификация силовых полупроводниковых ключей

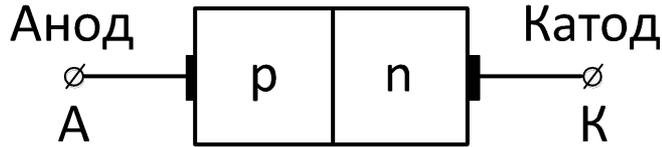
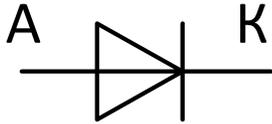


Области применения силовых полупроводниковых ключей



Диод, основные

Диод – полупроводниковый прибор, обладающий односторонней проводимостью. Проводимость диода зависит от полярности приложенного напряжения.



Условно диоды делятся по мощности на:

Диоды малой мощности – допустимый средний анодный ток $I_a \leq 1$ А;

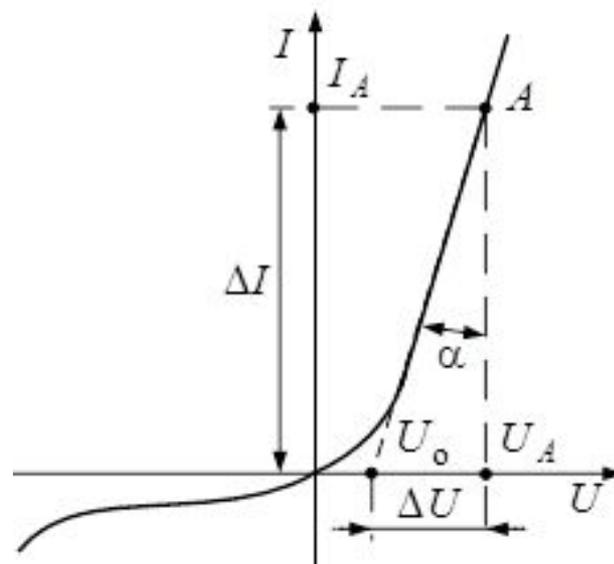
Диоды средней мощности – $I_a = 1-10$ А;

Диоды большой мощности – $I_a \geq 10$ А;

По назначению диоды делятся на *низкочастотные* ($f_{\text{доп}} < 500$ Гц)

и

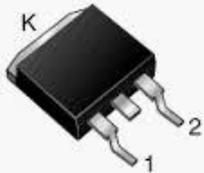
высокочастотные ($f_{\text{доп}} > 500$ Гц)



Диоды, внешний ВИД

Корпуса для планарного
монтажа

TO-263AB



Корпус TO-247



Корпус TO-220



Корпуса мощных
диодов



Диоды таблеточного
типа



Силовые диоды характеризуются системой статических, динамических и предельных параметров.

К статическим параметрам

относятся:

статическое сопротивление диода $R_{ст} = \frac{U}{I}$

номинальное значение прямого тока $I_{пр.ном}$

номинальное значение обратного тока $I_{обр.ном}$

номинальное значение обратного напряжения $U_{обр.ном}$

номинальное значение прямого падения напряжения $U_{пр.ном}$

напряжение отсечки U_0

В прямом направлении диод описывается уравнением

$$U = U_0 + R_{дин} \cdot I$$

К динамическим параметрам диода относятся:

динамическое сопротивление
диода $R_{\text{дин}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \text{tg}\beta$

скорость нарастания прямого
тока $\frac{di}{dt}$

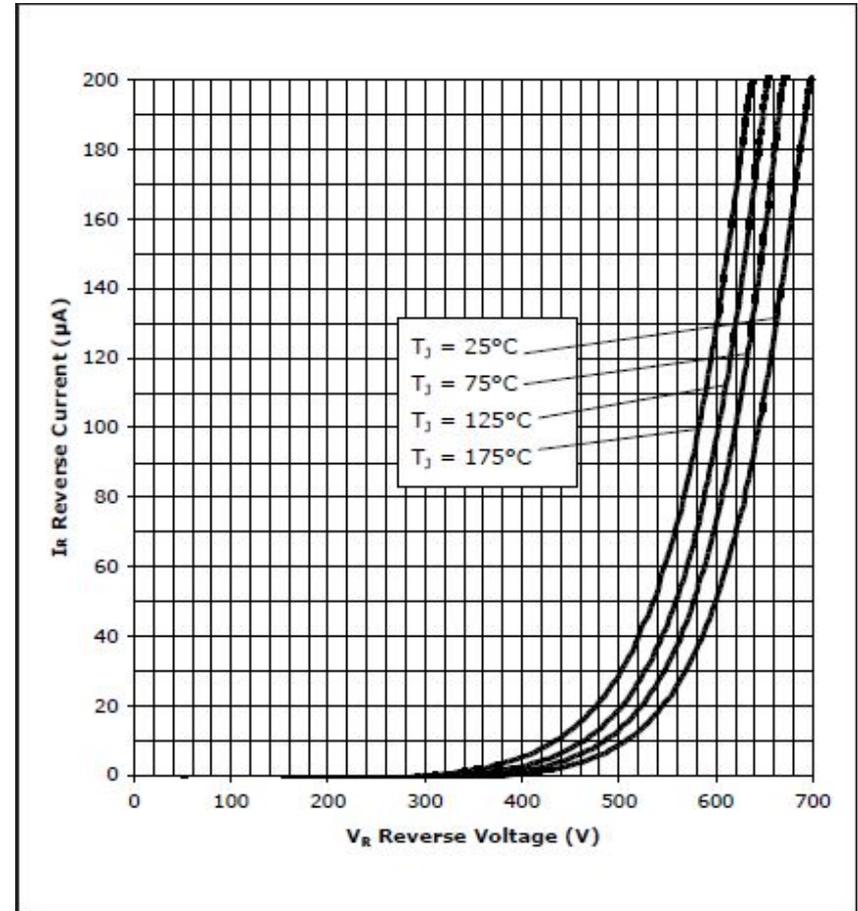
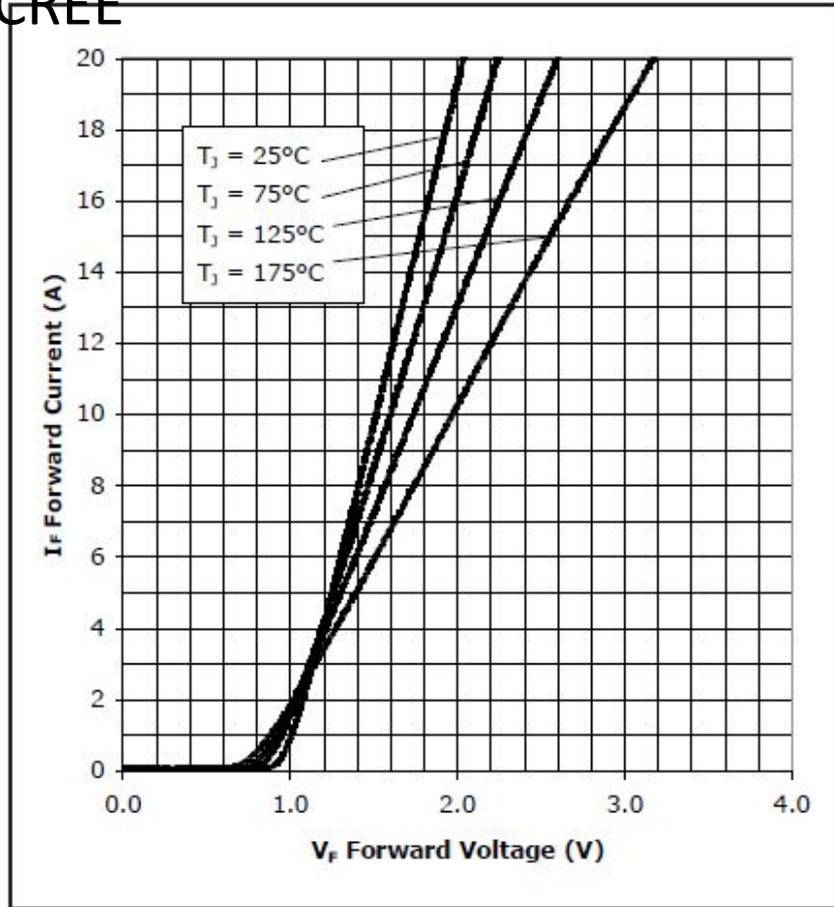
скорость нарастания обратного
напряжения $\frac{dU}{dt}$

время восстановления обратного напряжения $t_{\text{восст}}$

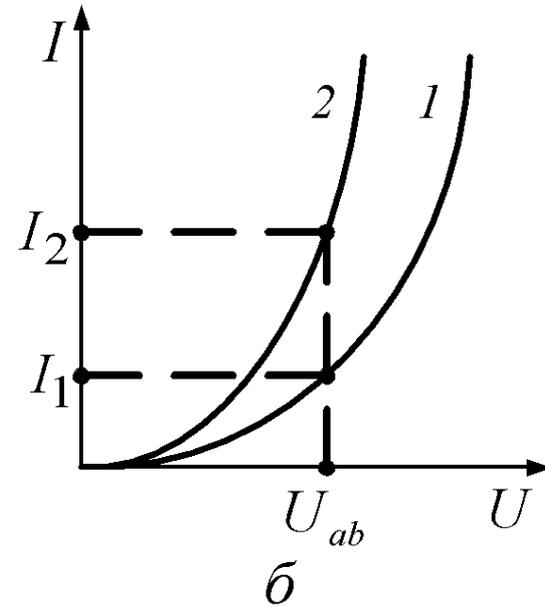
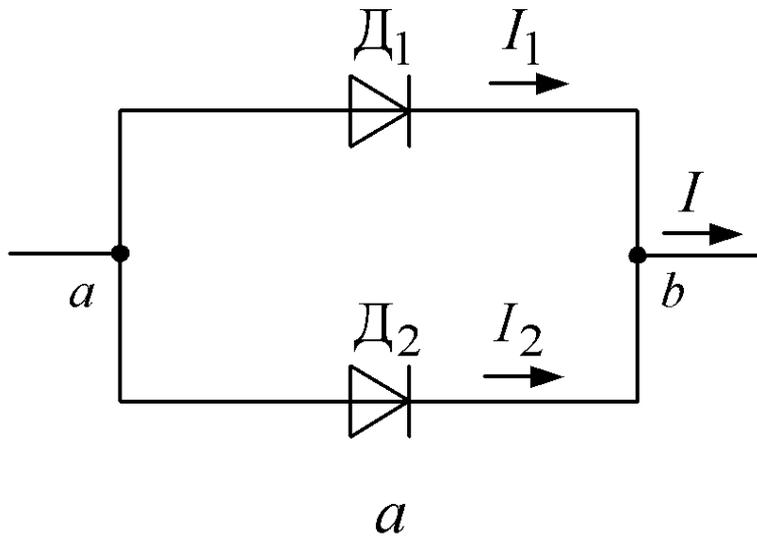
предельная
частота f_{max}

! Для использования в устройствах диод выбирается по среднему прямому току и обратному напряжению с двойным запасом.

Вольт-амперные характеристики диода CSD20060D фирмы GREE



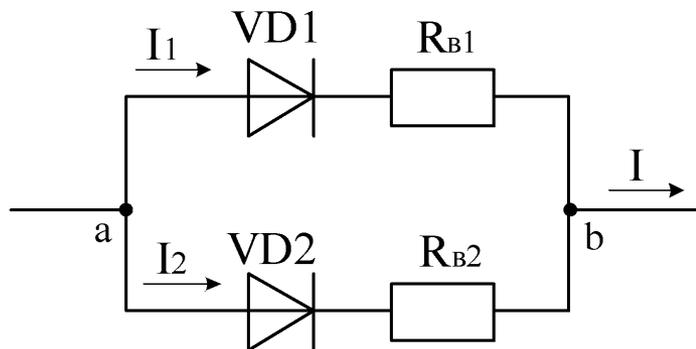
Параллельное соединение силовых диодов



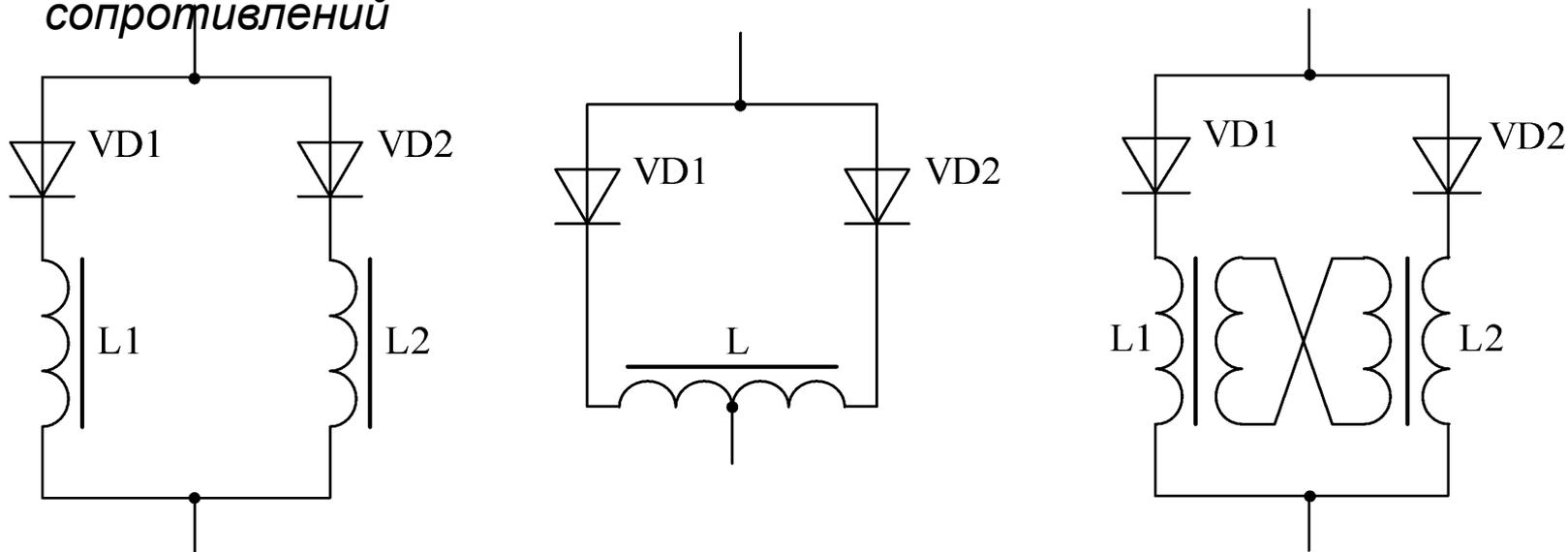
! При параллельном соединении силовых диодов их количество n определяется соотношением между током I , который будет протекать в цепи и – допустимым значением тока для каждого из параллельно соединенных диодов:

$$n = \frac{I}{I_{a \text{ доп}}}$$

Способы выравнивания токов при параллельном соединении диодов



Выравнивание токов с помощью выравнивающих сопротивлений

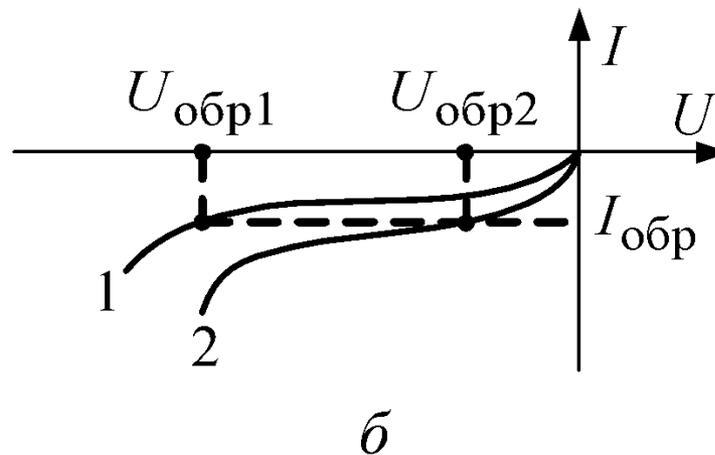
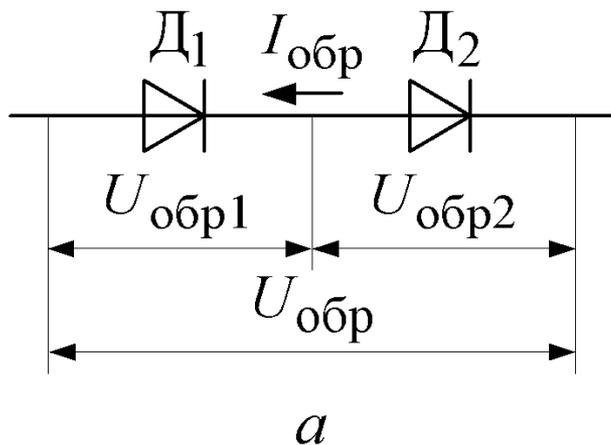


Выравнивание токов с помощью индуктивных делителей

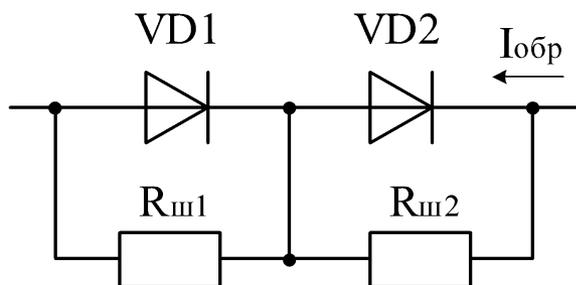
Последовательное соединение силовых ДИОДОВ

В случае, если обратное напряжение, прикладываемое к диоду, превышает максимально допустимое значение, то осуществляется последовательное включение нескольких диодов. Количество их n определяется соотношением величины прикладываемого обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ и максимально допустимой величины обратного напряжения диодов $U_{\text{обр.max}}$:

$$n = \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{обр.max}}}$$



Способы выравнивания напряжений при последовательном соединении диодов



Выравнивание обратных напряжений с помощью шунтовых резисторов

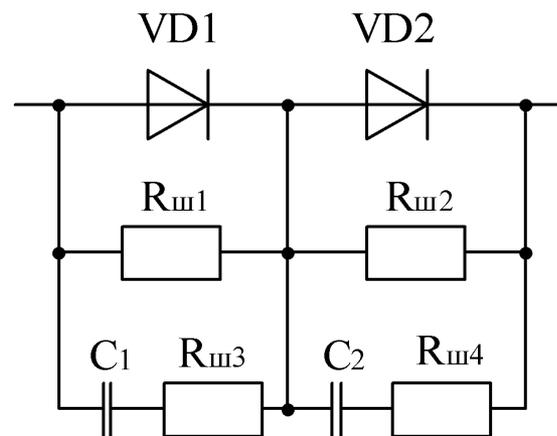


Схема выравнивания обратных напряжений в переходных режимах

Сопротивление выравнивающих резисторов определяется по формуле:

$$R_{\text{ш}} < \frac{n \cdot U_{\text{обр.max}} - U_{\text{обр}}}{(n - 1) \cdot I_{\text{обр.max}}}$$

где n – число последовательно включенных диодов;

$U_{\text{обр.max}}$ – максимально допустимое обратное напряжение для данного типа диодов;

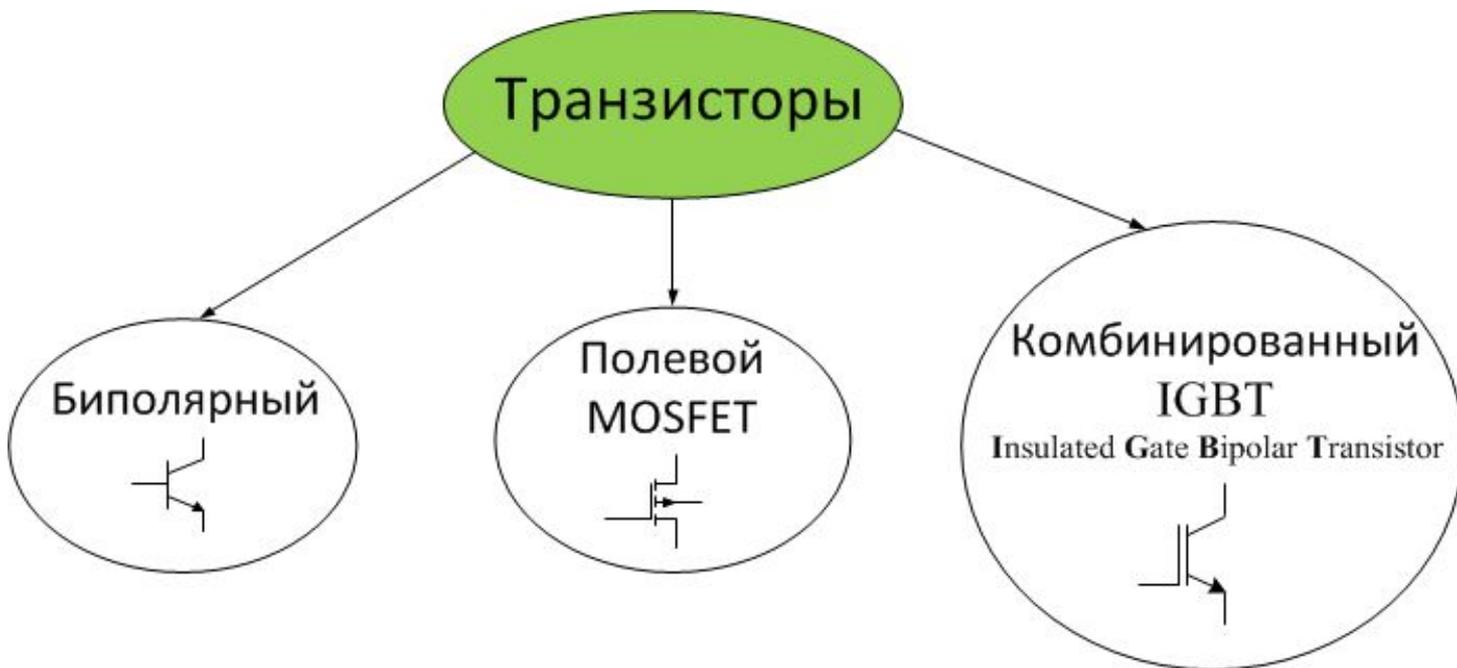
$U_{\text{обр}}$ – максимальное обратное суммарное напряжение, приложенное к диодам;

$I_{\text{обр.max}}$ – максимальное значение обратного тока диодов.

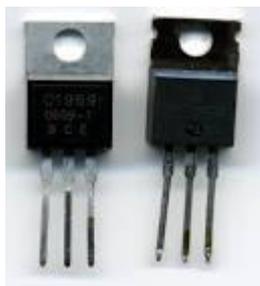
Для выравнивания напряжений в переходных режимах параллельно диодам включают R - C цепочки

Транзистор, основные

Транзистором называют **характеристики** прибор на основе полупроводникового кристалла, имеющий три (или более) электрода и предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний.



Корпус TO-220



TO-247



TO-227



Биполярный

транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих p - n перехода.

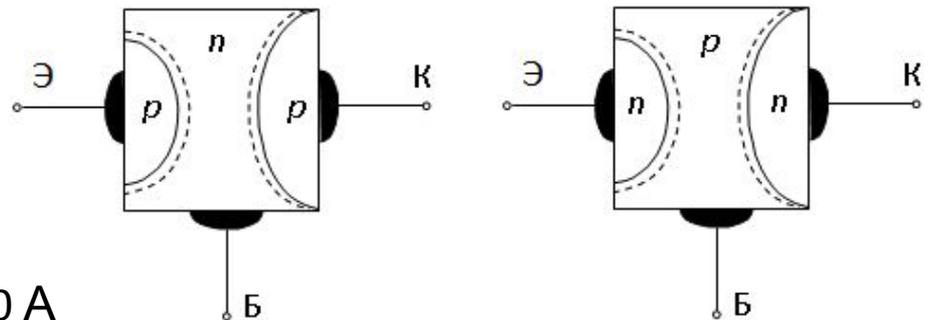
Он представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности.

- Средний слой структуры – база Б;
- Внешний слой, инжектирующий (внедряющий) носители – эмиттер Э;
- Собирающий носители – коллектор К;
- Ток базы является током управления;
- **!** Биполярный транзистор – электронный ключ управляемый током;

Основные

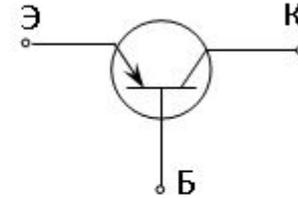
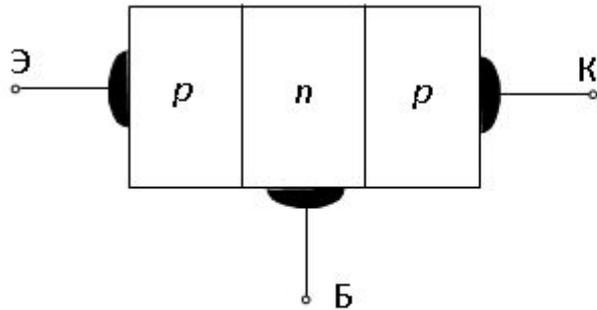
недостатки:

- Большие затраты мощности на управление;
- Относительно низкая рабочая частота;
- Биполярные транзисторы с током 50 А и более обычно рассчитаны на напряжение менее 600 В и частоту коммутации до 20 кГц.

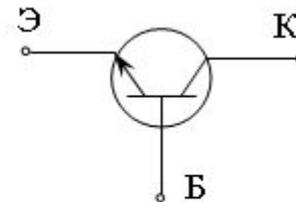
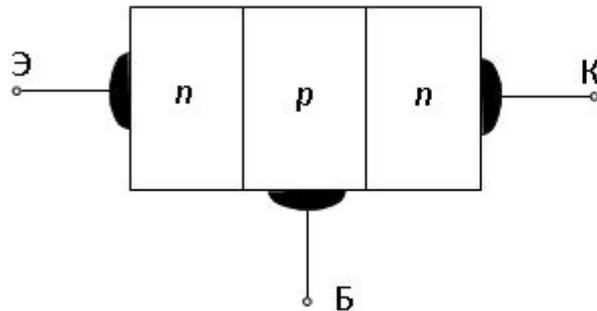


Структура биполярного транзистора

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают $p-n-p$ транзисторы и $n-p-n$ транзисторы.



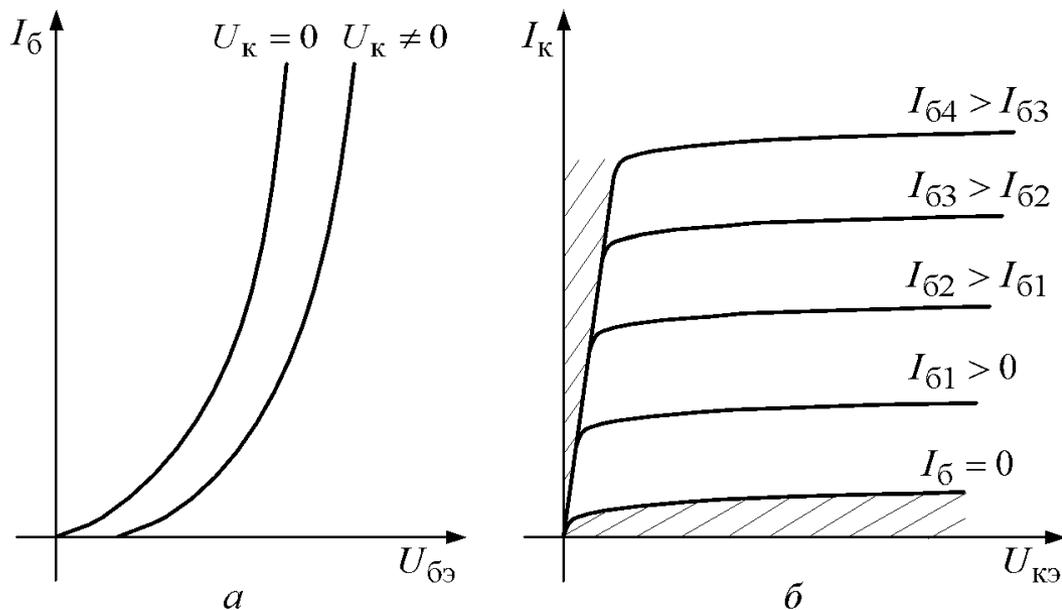
p-n-p транзистор



n-p-n транзистор

При работе транзистора возможны следующие три режима: линейный (усилительный), насыщения и отсечки.

Работа транзистора основана на управлении токами электродов, в зависимости от приложенных к его переходам напряжений.

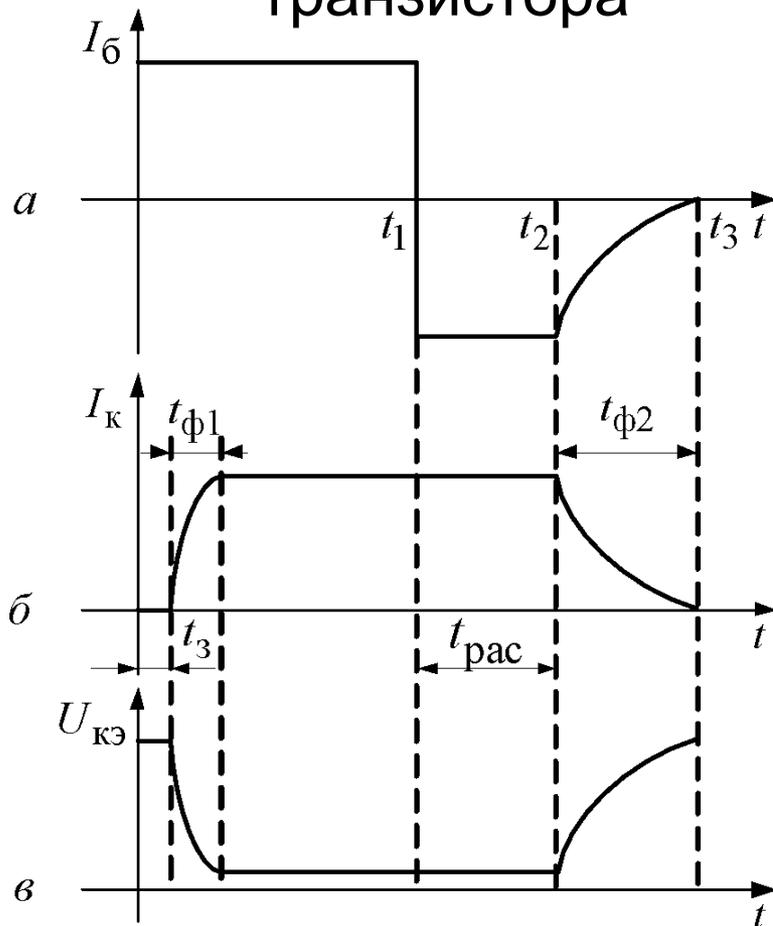


Ток коллектора транзистора:

$$I_{\text{к}} = \beta \cdot I_{\text{б}}$$

где β – коэффициент передачи транзистора по току

Процесс коммутации биполярного транзистора



В режиме **отсечки** через транзистор протекает очень маленький обратный коллекторный ток, которым в силовых транзисторах часто пренебрегают, а сам транзистор представляют в виде **разомкнутого ключа**. Наоборот, в режиме **насыщения** через транзистор протекает максимальный коллекторный ток, а напряжение очень мало, что позволяет представить насыщенный транзистор в виде **замкнутого ключа**.

И в режиме **насыщения**, и в режиме **отсечки** на транзисторе выделяется не большая мощность, значительно меньшая, чем в линейном режиме.

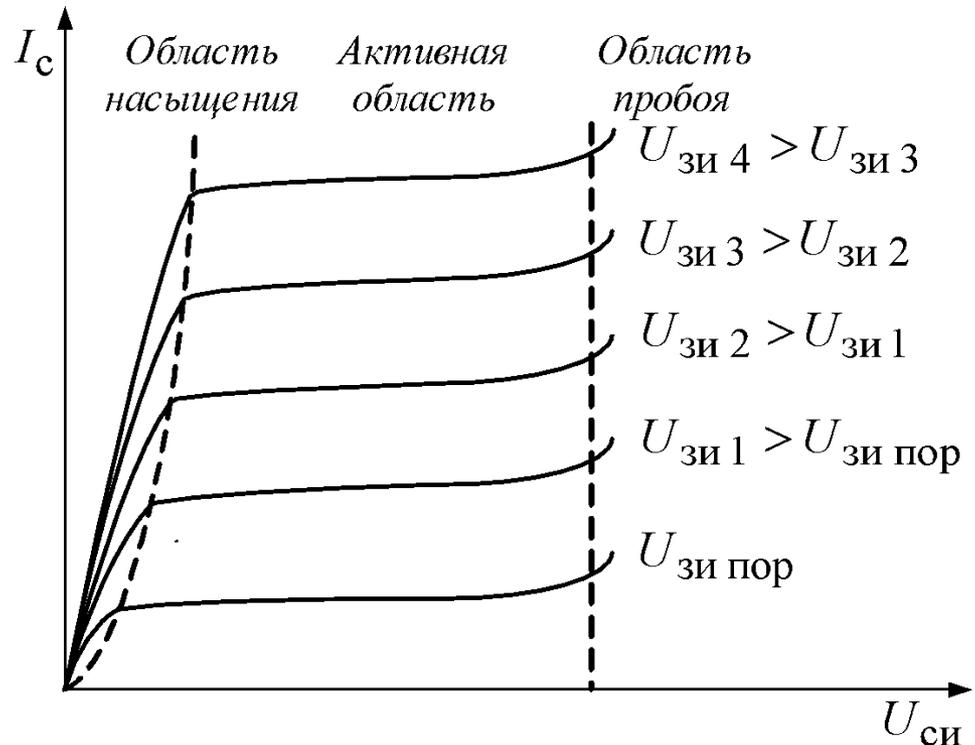
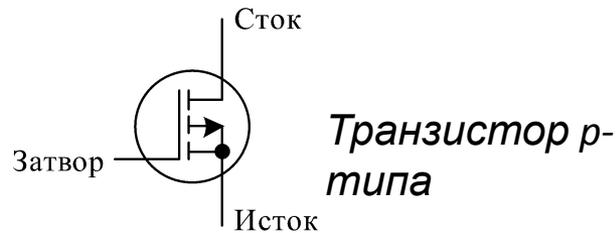
В настоящее время биполярные транзисторы почти полностью вытеснены более эффективными силовыми ключами, кроме устройств массового применения, где определяющим фактором является низкая стоимость на единицу мощности.

Полевые транзисторы

Принцип действия полевых транзисторов основан на изменении электрической проводимости на границе диэлектрика и полупроводника под воздействием *электрического поля*.

Полевые транзисторы – полупроводниковые приборы управляемые напряжением.

В зависимости от типа электрической проводимости канала различают транзисторы с n- и p-типами каналов.

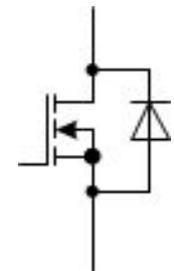
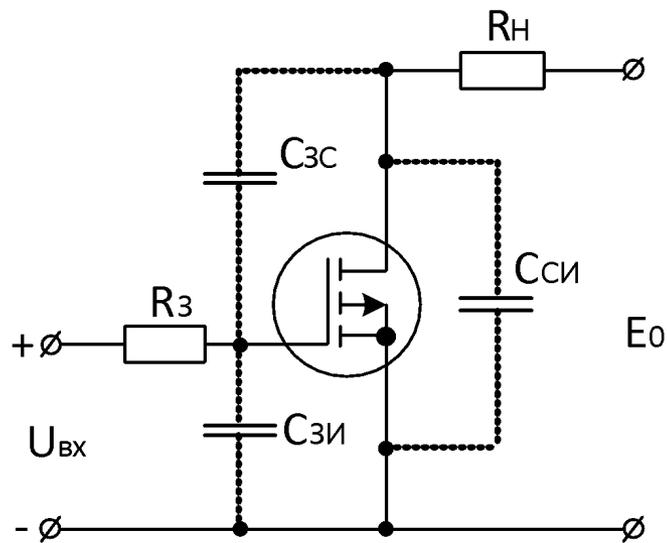


Обозначение транзисторов в отечественной и зарубежной литературе:

МОП-транзистор (Металл-Окисел-Полупроводник)

МДП-транзистор (Металл-Диэлектрик-Полупроводник)

MOSFET-транзистор (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

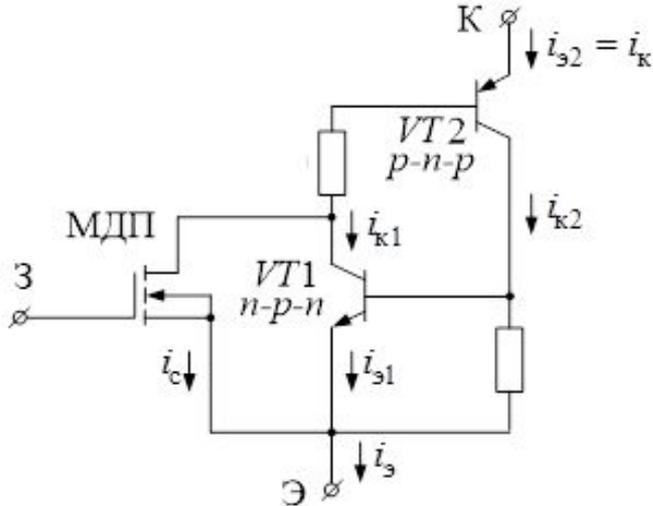


Наличие
антипараллельного
о диода

Биполярные транзисторы с изолированным затвором

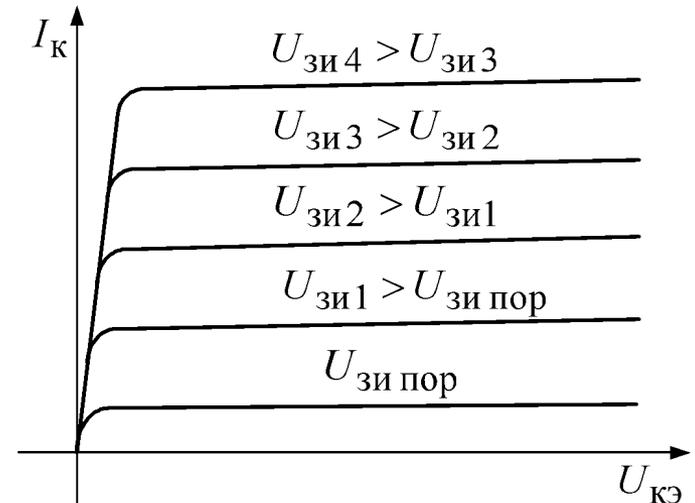
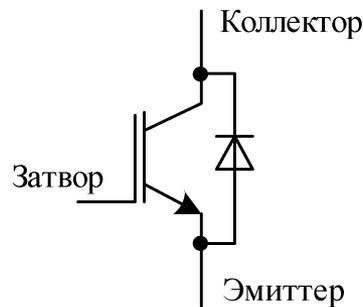
IGBT

Выполненный в одном кристалле, он имеет низкие потери мощности во включенном состоянии подобно биполярному транзистору и высокое входное сопротивление цепи управления, характерное для

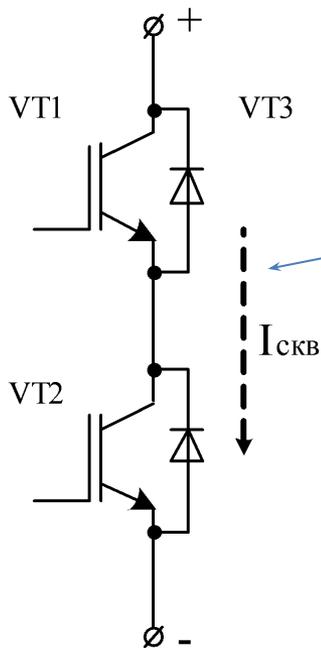
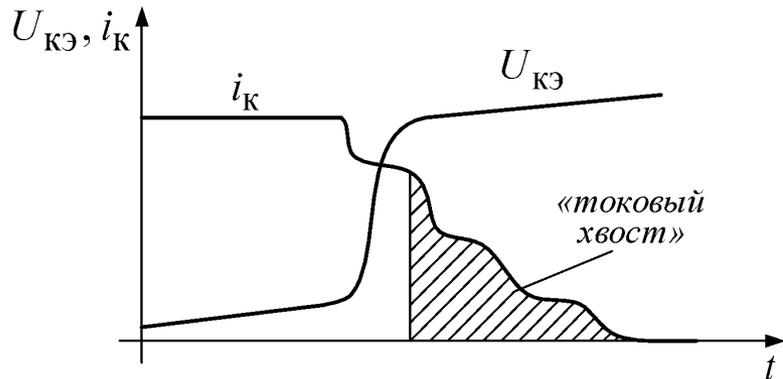


Внутренняя структура

Графическое изображение, выходные характеристики

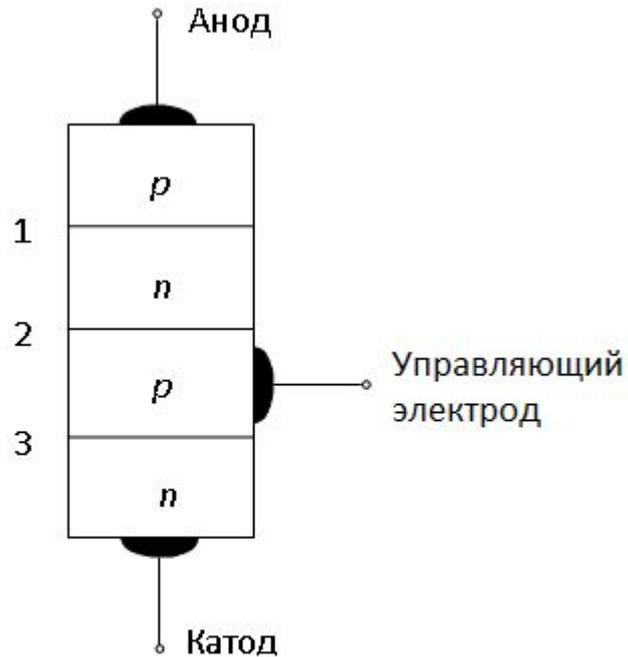


Процесс запираания IGBT транзистора

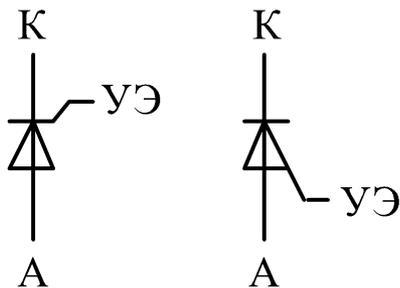


- Заряд, накопленный в базе биполярного транзистора, вызывает характерный «хвост» тока при выключении IGBT.
- Как только имеющийся в составе IGBT полевой транзистор MOSFET прекращает проводить ток, в силовой цепи начинается рекомбинация неосновных носителей, которая является началом «хвоста».
- Ток «хвост» ведет к увеличению тепловых потерь, а также его необходимо учитывать в мостовых схемах и вводить промежуток между интервалами проводимости двух ключей, установленных в одном плече моста.
- несмотря на отмеченные особенности IGBT-транзисторы на сегодняшний день представляются самыми перспективными элементами для использования в качестве силовых управляемых ключей в диапазоне мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт.

Тиристор

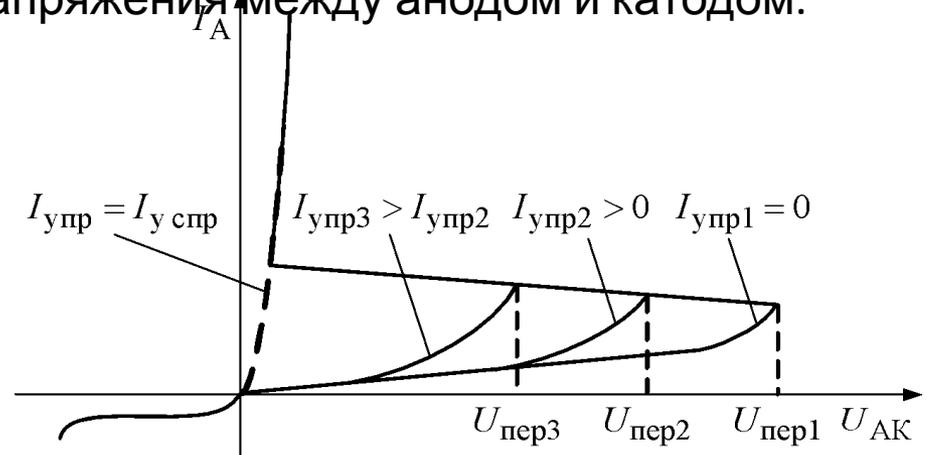


Тиристор с четырехслойной полупроводниковой структурой проводимости (p-n-p-n типа)

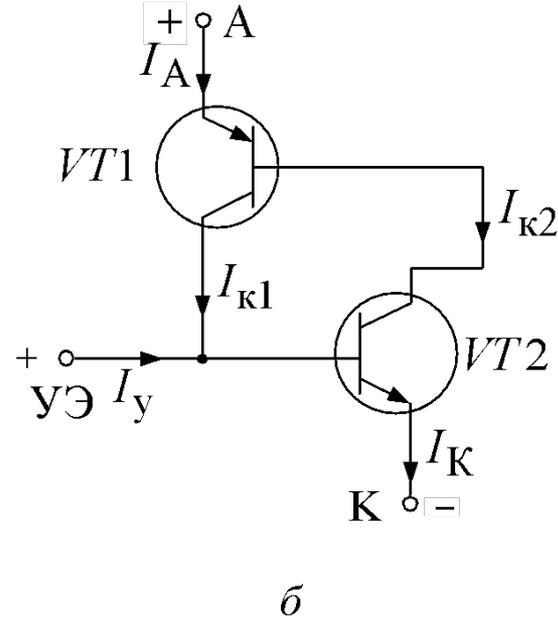
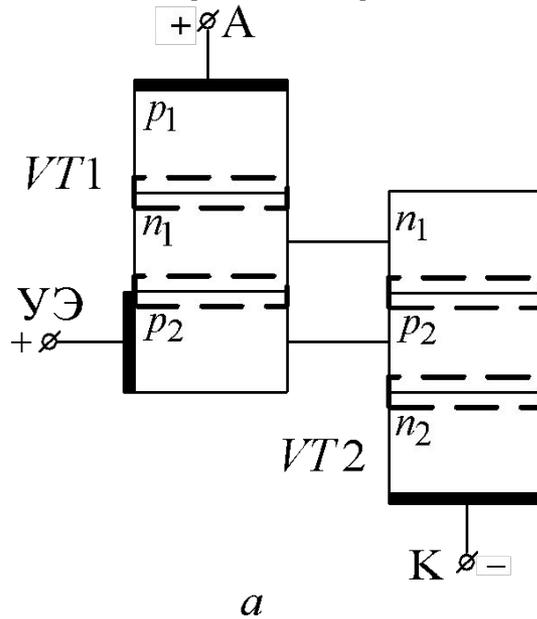


Обозначение на схеме

- Тиристоры представляют собой четырехслойную полупроводниковую структуру $p-n-p-n$ типов проводимости.
- Вывод от крайней области p называют анодом, вывод от крайней области n называют катодом, а вывод от одной из промежуточных областей называют управляющим электродом.
- Если между управляющим электродом и катодом пропустить маленький ток управления, то в зависимости от величины этого тока произойдет переключение тиристора из закрытого состояния в открытое при большем или меньшем значении напряжения между анодом и катодом.



Двухтранзисторная модель тиристора



В данной схеме возникает внутренняя положительная обратная связь, которая после включения тиристора делает цепь управления неэффективной, так как оба транзистора поддерживают друг друга в открытом состоянии и без цепи управления, т.е. закрыть обычный тиристор **по цепи управления невозможно**.

Для запираания тиристора необходимо, каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов.

Выпрямительные

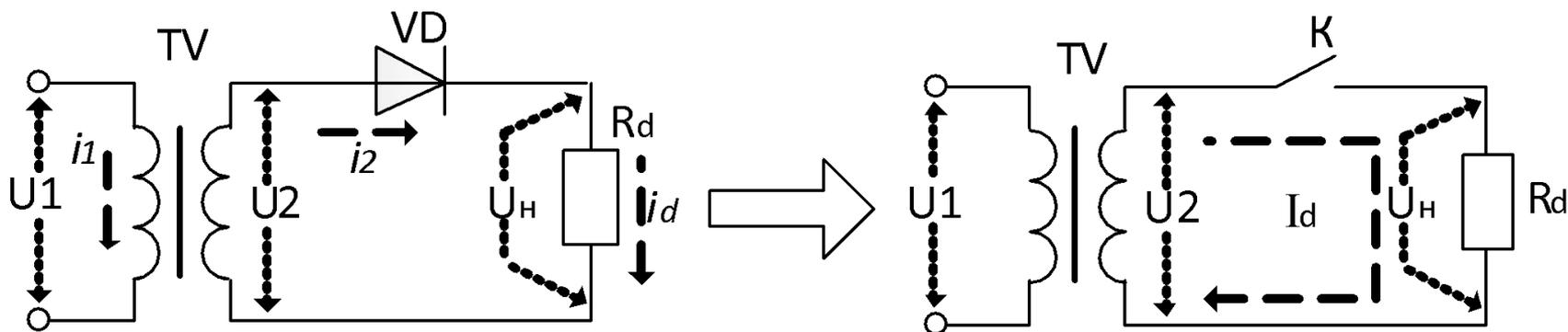
устройства
Выпрямителями называются устройства, преобразующие электрическую энергию переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямители называются неуправляемыми, если величина напряжения на выходе выпрямителя E_d определяется только переменным напряжением E_2 на его входе:

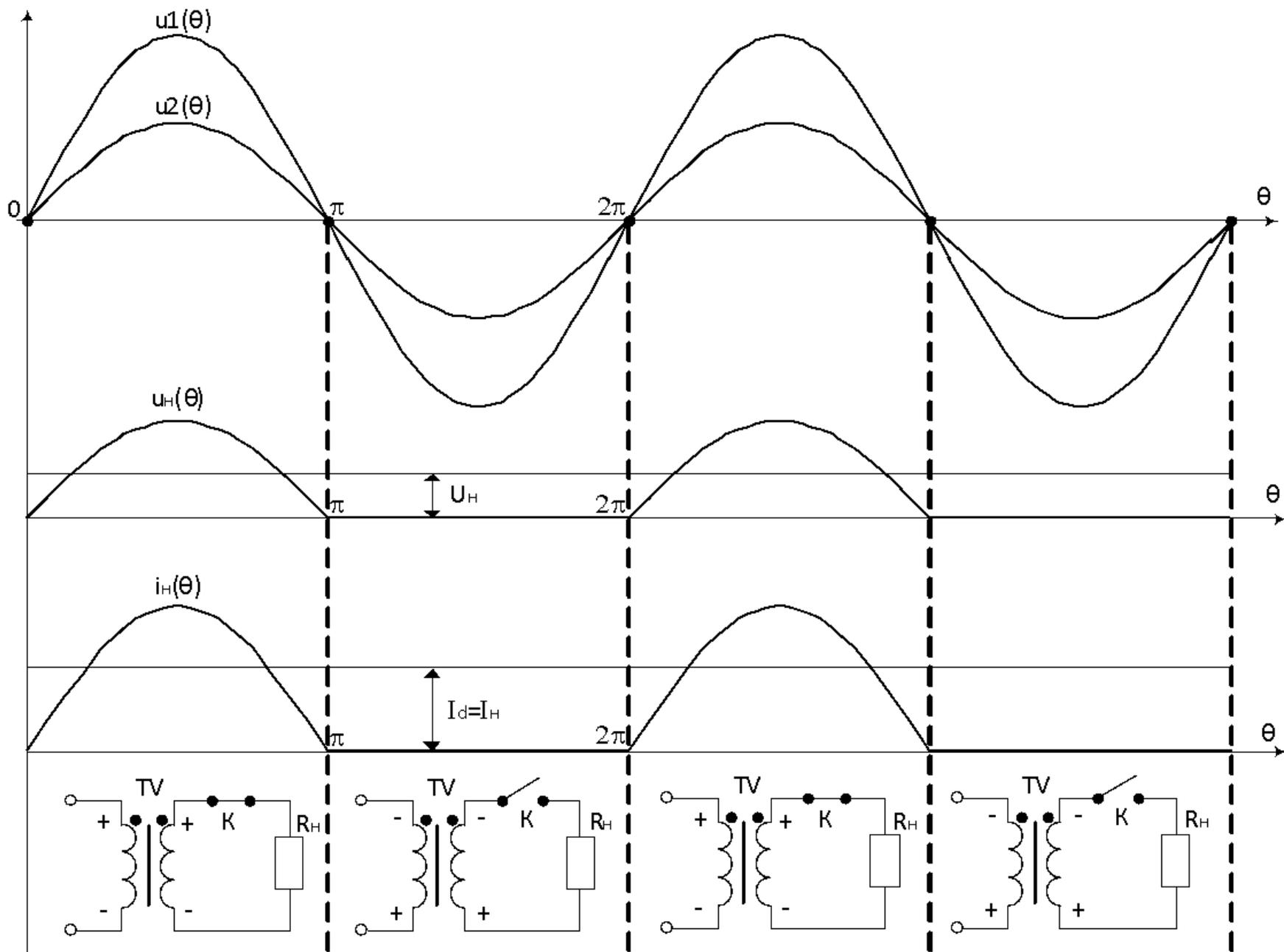
$$E_d = K_{cx} \cdot E_2$$

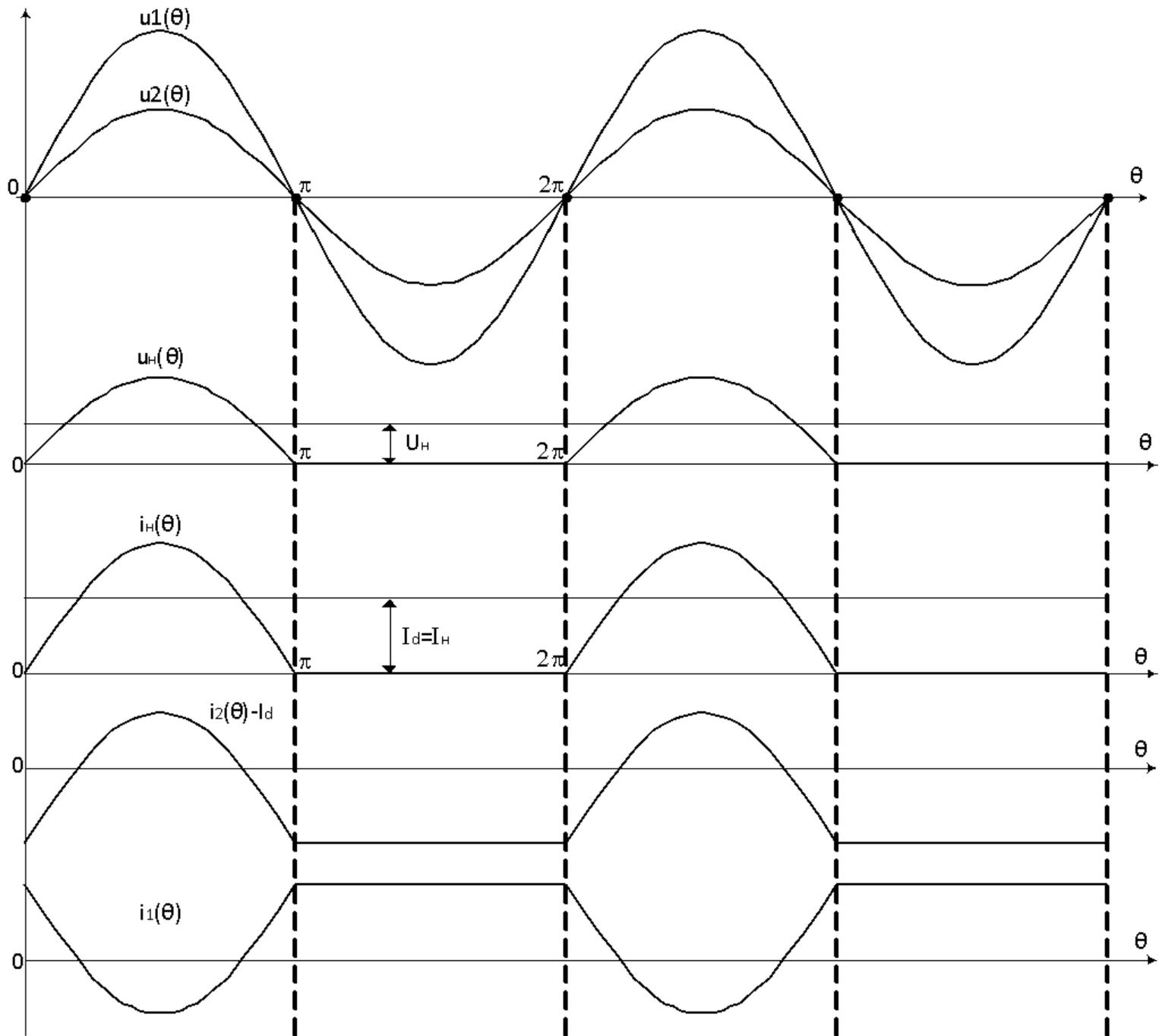
где K_{cx} – коэффициент пропорциональности, характерный для данной схемы выпрямления, называемый **коэффициентом схемы**.

Неуправляемые выпрямители

Однофазная однополупериодная схема выпрямления







! Трансформатор Тр играет двойную роль: он служит для подачи на вход выпрямителя ЭДС E_2 , соответствующей заданной величине выпрямленного напряжения E_d и обеспечивает гальваническую развязку цепи нагрузки и питающей сети.

Благодаря односторонней проводимости вентиля ток в цепи нагрузки будет протекать только в течение одной половины периода напряжения на вторичной обмотке трансформатора, что определяет и название этой схемы. Соотношения между основными параметрами найдем при следующих допущениях:

- 1) активным и индуктивным сопротивлением обмоток трансформатора пренебрегаем;
- 2) нагрузка имеет чисто активный характер;
- 3) вентиль В идеальный;
- 4) током намагничивания трансформатора пренебрегаем;
- 5) ЭДС обмотки трансформатора синусоидальна:

$$e_2 = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta$$

- На интервале $(0-\pi)$ ЭДС e_2 будет иметь полярность, прямую по отношению к вентилю В, вентиль открыт и в цепи нагрузки протекает ток.
- На интервале $(\pi-2\pi)$ ЭДС e_2 имеет противоположную полярность, вентиль В закрыт и ток нагрузки равен нулю.

Тогда мгновенное значение выпрямленного напряжения: $U_d|_{0 \div \pi} = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta$, $U_d|_{\pi \div 2\pi} = 0$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения:

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} U_d d\theta = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta d\theta = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{\pi} = 0.45 \cdot E_2.$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d}$$

Для данной схемы выпрямления среднее значение анодного тока вентиля (по которому он выбирается из справочника)

$$I_{аср} = I_d$$

Максимальное значение анодного

тока

$$i_{\text{amax}} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{R_2} = I_d \cdot \pi$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле (по которому он также выбирается)

$$U_{\text{вобр.мах}} = \sqrt{2} \cdot E_2 = E_d \cdot \pi$$

Расчетная мощность

трансформатора Тр:

$$P_{\text{расч.}} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

где P_1 и P_2 – расчетная мощность первичной и вторичной обмотки

Действующее значение тока вторичной обмотки

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} i_2^2 d\theta} = I_d \cdot \frac{\pi}{2}$$

Тогда $P_2 = E_2 \cdot I_2$ может быть получена

$$P_2 = \frac{E_d \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot I_d = 3.49 P_d$$

где $P_d = E_d \cdot I_d$ – мощность нагрузки

Мощность первичной обмотки трансформатора $P_1 = E_1 \cdot I_1$, где E_1 и I_1 – действующие значения ЭДС и тока первичной обмотки трансформатора E_1 , находится как $E_1 = E_2 \cdot K_{\text{тр}}$, где $K_{\text{тр}} = W_1/W_2$ – коэффициент трансформации;

W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Действующее значение тока первичной обмотки

определяется —

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} i_1^2 d\theta} \quad \text{где } i_1 \text{ – мгновенное значение первичного тока.}$$

Из условия равенства намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток трансформатора

$$i_1 \cdot w_1 + (i_2 - I_d) \cdot w_2 = 0$$

Находим

$$i_1: \quad i_1 = -\frac{W_2}{W_1} \cdot (i_2 - I_d) = -\frac{1}{K_{\text{тр}}} \cdot (i_2 - I_d).$$

Поскольку i_2 протекает во вторичной обмотке трансформатора только на интервале от 0 до π , а на интервале $(\pi-2\pi)$ он равен 0, то

$$\begin{cases} i_1 \Big|_{0 \div \pi} = \frac{I_d}{K_{\text{тр}}} \cdot (1 - \pi \cdot \sin\theta) \\ i_1 \Big|_{\pi \div 2\pi} = \frac{I_d}{K_{\text{тр}}} \end{cases}$$

Графическое изображение этой функции представлено на рисунке. Оно является зеркальным отображением функции $(i_2 - I_d)$, но масштабы их отличаются в $K_{тр}$ раз. Подставляя значения, получаем действующее значение первичного тока:

$$I_1 = 1.21 \cdot \frac{I_d}{K_{тр}}$$

Мощность первичной обмотки трансформатора $P_1 = E_1 \cdot I_1 = 2.69 \cdot P_d$

тогда
$$P_{расч.} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 3.06 \cdot P_d$$

Так как в первичную обмотку трансформируется лишь переменная составляющая вторичного тока, то в магнитопроводе трансформатора создается постоянный **ПОТОК ПОДМАГНИЧИВАНИЯ**.

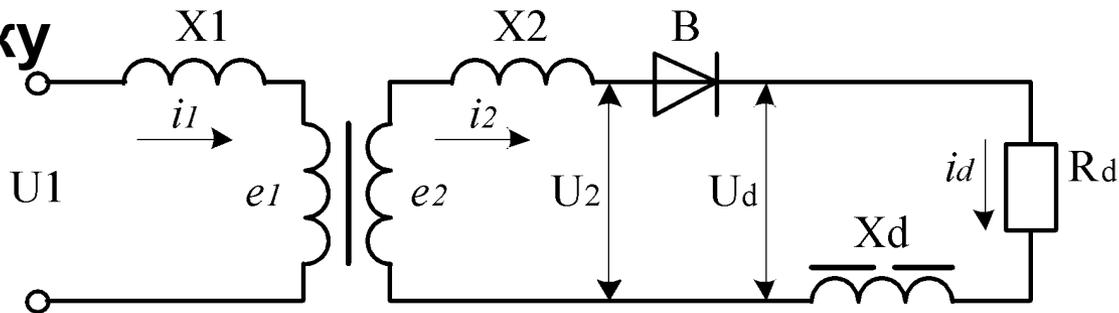
Этот поток вызывает дополнительное магнитное насыщение элементов магнитопровода; для того чтобы это насыщение не превышало допустимого значения, необходимо увеличить габариты сердечника.

Эта мера приводит к увеличению расхода стали и меди, т.е. ведет к повышению габаритов, веса и стоимости трансформатора.

Этот недостаток однофазной однополупериодной схемы распространяется и на трехфазную однополупериодную схему при соединении вторичной обмотки трансформатора по схеме «звезда-звезда с нулевым выводом».

Однофазную однополупериодную схему применяют лишь для маломощных выпрямителей, что объясняется не только недостатком, вызванным наличием потока подмагничивания, но и значительными пульсациями выпрямленного

Работа выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку



Как правило, нагрузка имеет активно-индуктивный характер, особенно в выпрямителях средней и большой мощности, где для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и тока в цепь нагрузки часто включают сглаживающий дроссель.

Анализ электромагнитных процессов в этом случае проведём с учетом индуктивных сопротивлений рассеяния первичной X_1 и вторичной X_2 обмоток трансформатора

Уравнение для цепи первичной обмотки имеет вид

$$e_1 - X_1 \cdot \frac{di_1}{d\theta} + U_1 = 0$$

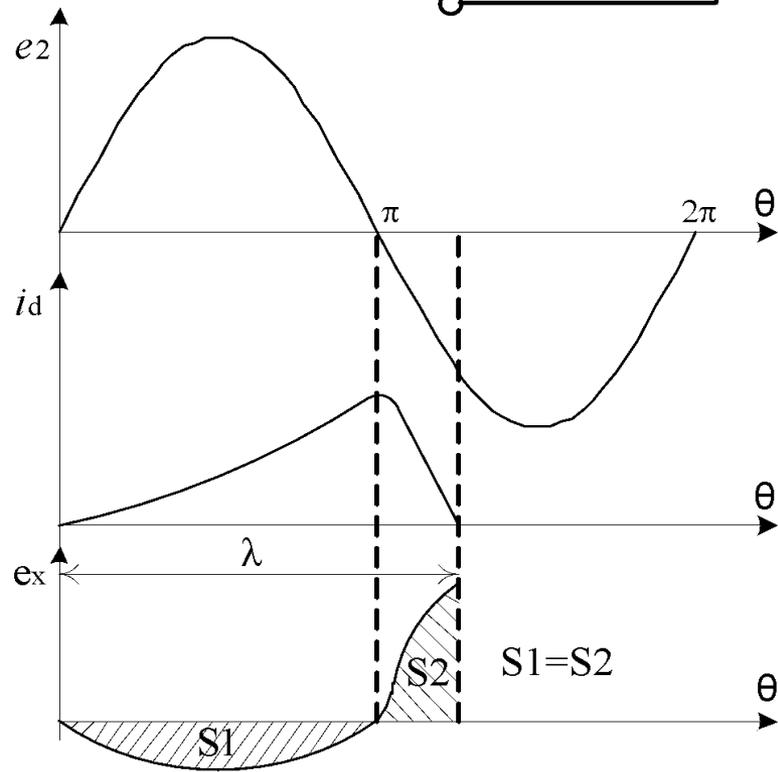
Отсюда выразим

$$e_1 = -U_1 + X_1 \cdot \frac{di_1}{d\theta}$$

e_1 :

где первичный ток i_1 выражается как

$$i_1 = -\frac{1}{K_{тр}} \cdot (i_2 - I_d).$$



Для цепи вторичной обмотки трансформатора справедливо уравнение:

$$U_2 = e_2 - X_2 \cdot \frac{di_2}{d\theta} \quad \text{где} \quad e_2 = \frac{e_1}{K_{\text{тр}}}$$

Преобразование этого выражения дает:

$$U_2 = -\frac{U_1}{K_{\text{тр}}} \left(\frac{x_1}{K_{\text{тр}}^2} + X_2 \right) \cdot \frac{di_2}{d\theta} = -\frac{U_1}{K_{\text{тр}}} - X_a \cdot \frac{di_2}{d\theta}$$

где $X_a = \left(\frac{X_1}{K_{\text{тр}}^2} + X_2 \right)$ суммарное индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной цепи.

Для цепи нагрузки можно записать

$$U_d = i_d \cdot R_d = U_2 - X_d \frac{di_d}{d\theta}$$

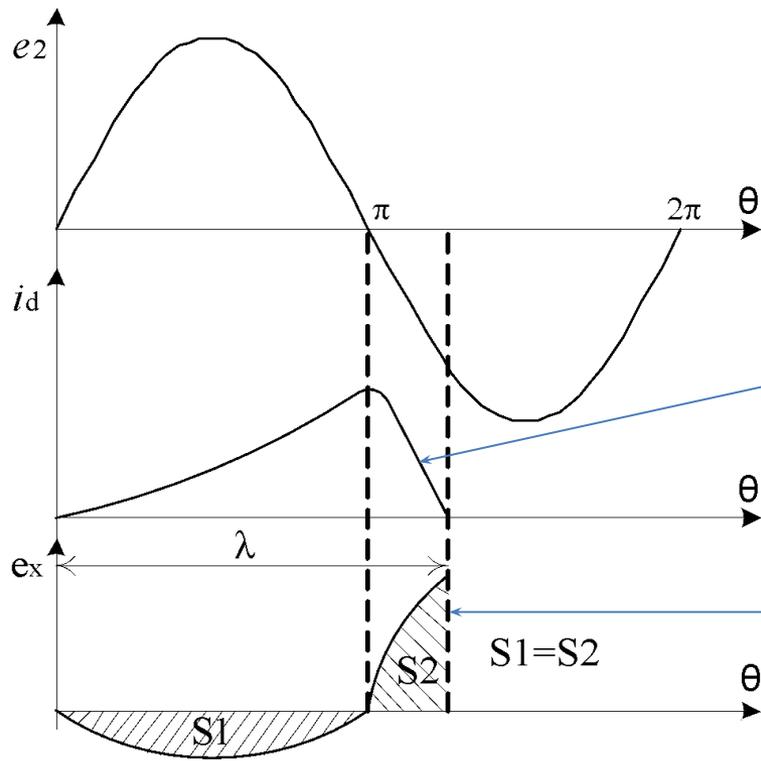
Подставляя сюда U_2 из предыдущего выражения и обозначая

$$-\frac{U_1}{K_{\text{тр}}} = E_2 \quad \text{и} \quad X_d + X_a = X$$

получаем $X \frac{di_d}{d\theta} + i_d \cdot R_d = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin\theta$
и:

Решение этого уравнения относительно тока i_d с учетом нулевых начальных условий дает

$$i_d = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{\sqrt{X^2 + R_d^2}} \left[\sin\varphi \cdot e^{-\text{ctg}\varphi\theta} + \sin(\theta - \varphi) \right] \quad \text{где} \quad \varphi = \text{arctg} \frac{X}{R_d}$$



$$i_d = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{\sqrt{X^2 + R_d^2}} \left[\sin \varphi \cdot e^{-\text{ctg } \varphi \theta} + \sin(\theta - \varphi) \right]$$

$$e_x = -X_d \frac{di_d}{d\theta}$$

Следует отметить, что, исходя из принципа сохранения энергии, площадь S_1 , расположенная ниже оси абсцисс должна быть равна площади S_2 , расположенной выше оси абсцисс.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения:

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\lambda U_d d\theta = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\lambda (e_2 - e_x) d\theta = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \cos \lambda)$$

где λ – длительность интервала проводящего состояния вентиля В, или в относительных единицах:

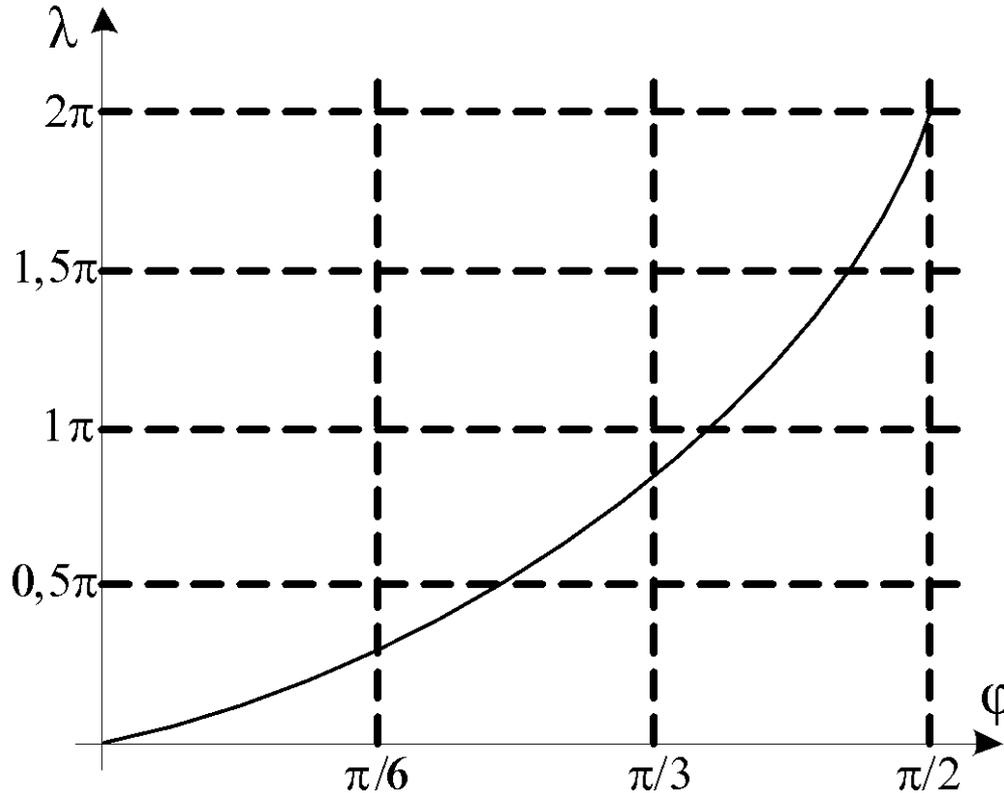
$$E_d^* = \frac{E_d}{E_{\max}} = \frac{1 - \cos \lambda}{2}$$

При определении длительности λ справедливо
условие:

$$i_d|_{\theta=\lambda} = 0$$

а \longrightarrow $\sin \varphi \cdot e^{\operatorname{ctg} \varphi \lambda} + \sin(\lambda - \varphi) = 0$
значит

Зависимость $\lambda = f(\varphi)$ имеет
вид



*Зависимость длительности
проводящего состояния
вентиля от параметров
нагрузки*

Определим составляющую выпрямленного

тока:

$$I_d = \frac{E_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{2 \cdot \pi \cdot R_d} \cdot (1 - \cos\lambda)$$

выразим в относительных
единицах:

$$I_d^* = \frac{I_d}{I_{d\max}} = \frac{1 - \cos\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{tg}\varphi = \frac{E_d^*}{\pi} \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

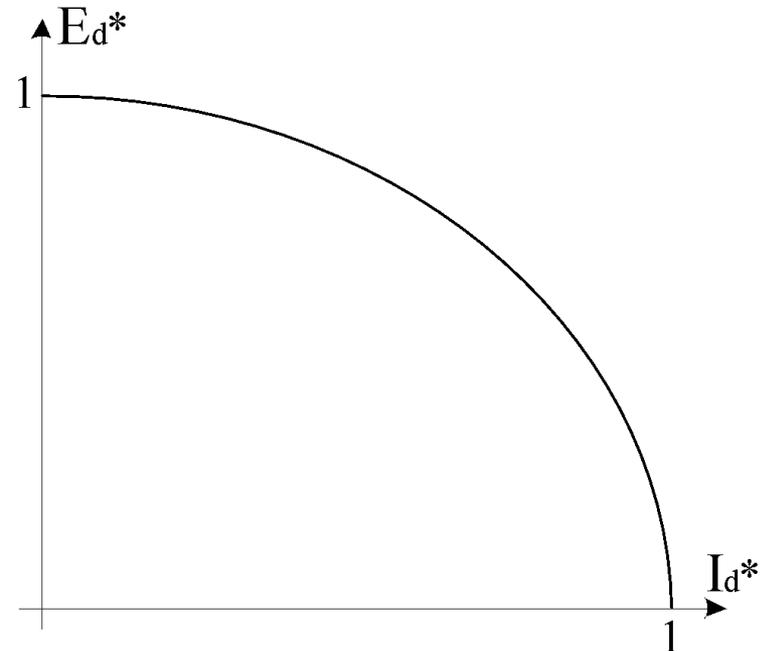
где
е

$$I_{d\max} = i_d \Big|_{R_d = 0} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{X}$$

Таким образом, последнее выражение представляет собой уравнение
внешней характеристики выпрямителя

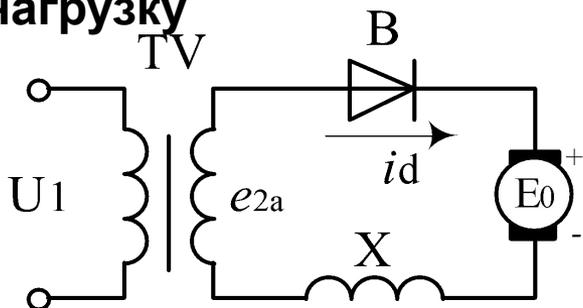
$$E_d^* = f(I_d^*)$$

*Внешняя характеристика
выпрямителя при работе на
активно-индуктивную
нагрузку*



При работе выпрямителя на двигательную нагрузку, при заряде аккумуляторных батарей и в других случаях, когда в цепи нагрузки имеется **противо-ЭДС**, имеют место определенные особенности.

Работа однофазного однополупериодного выпрямителя на двигательную нагрузку



X – суммарное индуктивное сопротивление в цепи вторичной обмотки трансформатора.

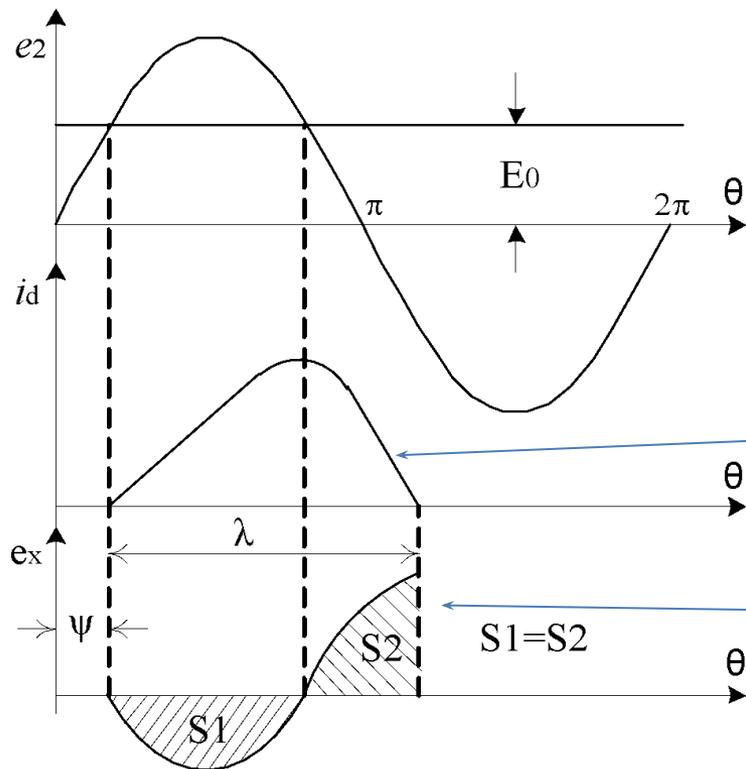
Из-за наличия противо-ЭДС вентиль V откроется только в точке ψ .

Поэтому, взяв за начало координат точку ψ запишем для цепи нагрузки:

$$e_2 - X \frac{di_d}{d\theta} = E_0 \quad \text{или} \quad \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin(\theta + \psi) - X \frac{di_d}{d\theta} = E_0$$

Решая это уравнение относительно i_d с учетом нулевых начальных условий, получаем:

$$i_d = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{X} [\cos \psi - \cos(\theta + \psi)] - \frac{E_0}{X} \theta$$



$$e_x = -X \frac{di}{d\theta}$$

Постоянная составляющая тока нагрузки в этом случае:

$$I_d = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\lambda i_d d\theta = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{2 \cdot \pi \cdot X} [\lambda \cdot \cos\psi - \sin(\lambda + \psi) + \sin\psi] - \frac{E_0 \cdot \delta^2 \cdot \pi}{X} \quad \text{где } \delta = \frac{\lambda}{2\pi}$$

В относительных единицах это выражение примет

вид:

$$I_d^* = \frac{I_d}{I_{d\max}} = \frac{1}{2\pi} [\lambda \cdot \cos\psi - \sin(\lambda + \psi) + \sin\psi] - E_d^* \cdot \delta^2$$

где

$$I_{d\max} \Big|_{E_0=0} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{X} \quad E_d^* = \frac{E_0}{E_{d\max}} \quad E_{d\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{\pi}$$

Для установления зависимости между λ , ψ и I_d воспользуемся условием $\frac{dI_d}{d\theta} = 0$, $\theta = \lambda$

откуда

$$\cos\psi - \cos(\lambda + \psi) = \frac{E_d^* \cdot \lambda}{\pi}$$

находим:

Связь между E_d^* и ψ дает выражение:

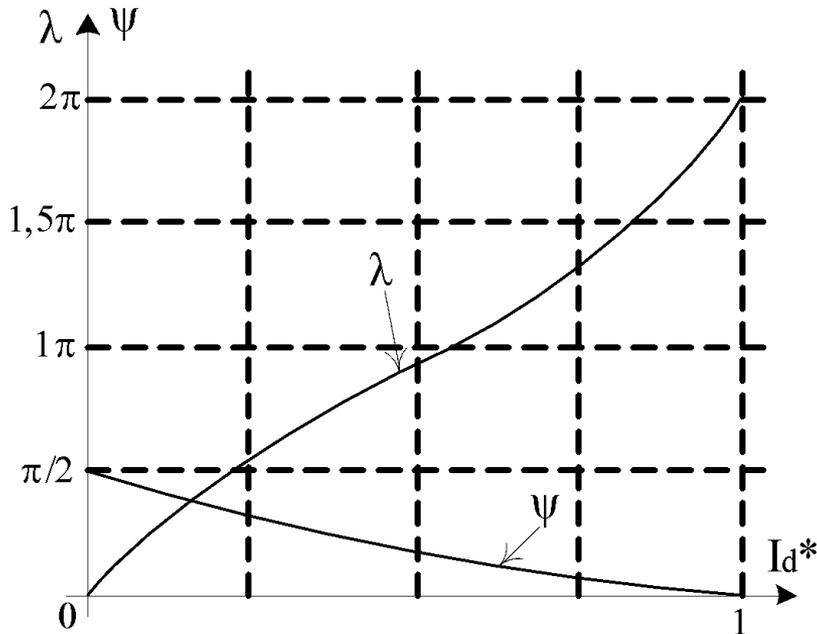
$$\sin\psi = \frac{E_d^* \cdot 1}{\pi}$$

которое получается из исходного уравнения для этой схемы в начале координат ($\theta=0$).

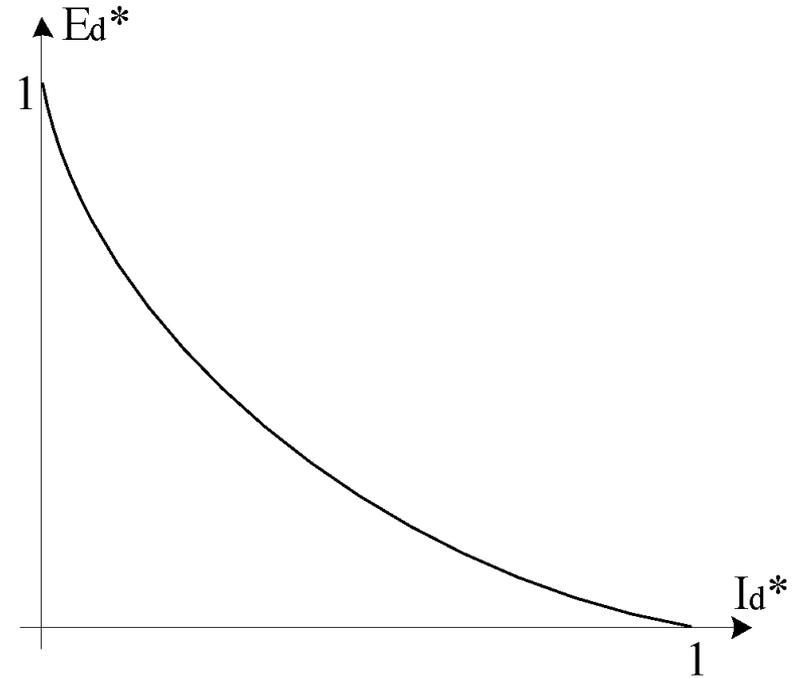
Таким образом, полученные выражения позволяют построить

зависимости $\lambda = f(I_d^*)$ $\psi = f(I_d^*)$ и внешнюю характеристику выпрямителя

$$E_d^* = f(I_d^*)$$



Зависимость длительности проводящего состояния вентилей и угла задержки от тока нагрузки



Внешняя характеристика выпрямителя, работающего на двигательную нагрузку