

Лекции по курсу :

Силовые преобразователи в электроснабжении

*Кафедра электроснабжения
промышленных предприятий
Энергетический институт
Томского политехнического
университета*

Составлено по следующим источникам:

1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении. Учебное пособие. – Томск, Изд. ТПУ, 2006.
2. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. – Ленинград, Энергия, 1985.
3. Руденко В.И. и др. Основы преобразовательной техники. Учебник для ВУЗов, 2-е издание М.: Высш. шк., 1980 – 286 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. Второе издание, стереотипное.-М.: ООО ИД «Альянс», 2008. -496 с., ил.

Тема 2. Режимы работы силовых полупроводниковых приборов

- ✓ Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров.
- ✓ Групповое соединение полупроводниковых приборов.
- ✓ Основы теплового расчета СПП.
- ✓ Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров.
- ✓ Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

К силовым полупроводниковым приборам (СПП) относятся полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, транзисторы с предельным средним или действующим током не менее 10 А, которые способны рассеивать мощность 10 Вт и более.

По принципу действия СПП делятся на следующие основные виды: диоды, тиристоры, тиристоры симметричные, стабилитроны, ограничители напряжения, транзисторы).

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Обозначения приборов по видам

Вид прибора	Обозначение
Диод	Д
Тиристор, не проводящий в обратном направлении	Т
Тиристор, проводящий в обратном направлении	ТН
Тиристор симметричный	ТС
Стабилитрон	С
Ограничитель напряжения	ОН
Транзистор	ТК

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Чаще всего в силовых электрических цепях применяются полупроводниковые **диоды** (неуправляемые вентили) и **тиристоры** (управляемые вентили). Рассмотрим характеристики, основные параметры и схемы замещения неуправляемых и управляемых вентиляей.

Диод – это полупроводниковый прибор, пропускающий электрический ток только одного направления и имеющий два вывода для включения в электрическую цепь.

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор с ***p-n***-переходом. Рабочий элемент – кристалл **германия** или **кремния**, обладающий проводимостью ***n***-типа за счёт небольшой добавки донорной примеси. Для создания в нём ***p-n***-переходов в одну из его поверхностей **вплавляют индий**. Вследствие диффузии атомов индия вглубь монокристалла германия у поверхности германия образуется область ***p***-типа. Остальная часть германия по-прежнему остаётся ***n***-типа. Между этими двумя областями возникает ***p-n***-переход.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметический корпус.

Достоинствами полупроводниковых диодов являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность; недостатком – зависимость их параметров от температуры.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Основу конструкции силовых полупроводниковых приборов составляет полупроводниковая структура, которая определяет его электрические параметры и характеристики.

Основными требованиями, предъявляемыми к конструкции силовых полупроводниковых приборов, являются необходимая механическая прочность, хорошие массо-габаритные показатели, высокая эксплуатационная надежность, удобство подключения, надежное соединение с охладителем.

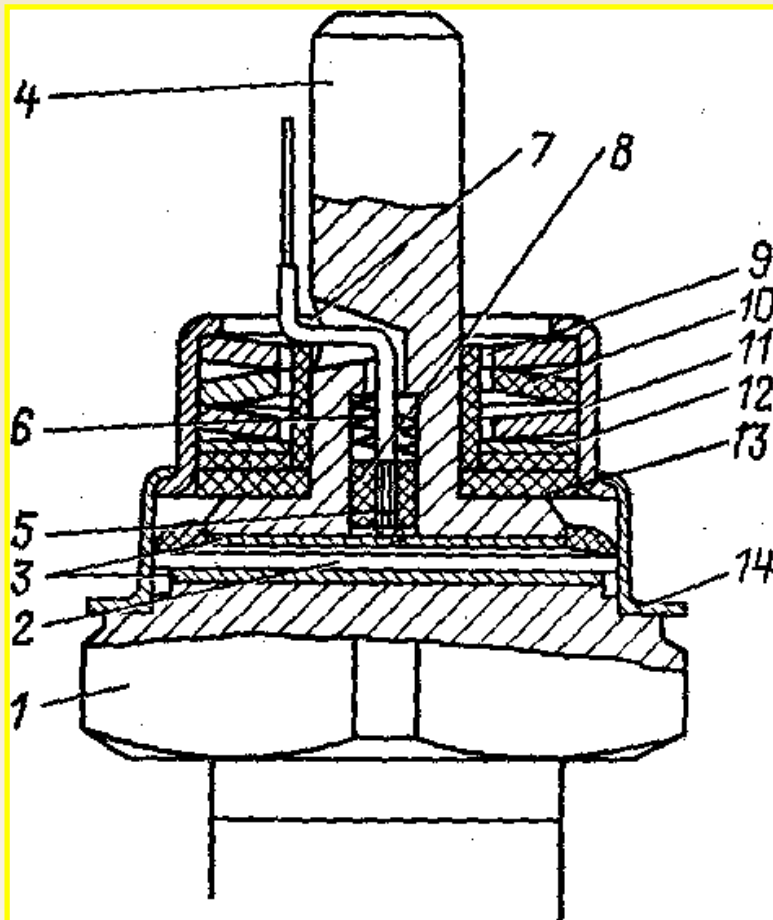
Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Для достижения вышеназванных требований полупроводниковая структура прибора помещается в специальный корпус, который обеспечивает надежную защиту от окружающей среды и хороший электрический и тепловой контакт.

По виду конструкции корпуса все силовые полупроводниковые приборы подразделяются на штырьевые с плоским основанием, таблеточные и выполненные совместно с системой охлаждения.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Наибольшее распространение получила
штырьевая конструкция силовых
полупроводниковых приборов



К основанию корпуса **1**
припаян вентиляльный
элемент, состоящий из
кремниевой пластины **2**,
помещенной между
двумя вольфрамовыми
дисками **3**.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

К верхнему вольфрамовому диску припаяны чашечки **13**, которые соединяют полупроводниковую структуру с внешним силовым выводом **4**.

В верхнем диске также имеется отверстие, в котором размещена молибденовая пластина с припаянным к ней управляющим электродом **5**. Пружинные элементы **9** и термокомпенсаторы **10** прижаты металлокерамической крышкой **14** и обеспечивают надежный тепловой и электрический контакт полупроводниковой структуры с корпусом.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Электрические потери, возникающие в приборе при прохождении через него тока, приводят **к выделению тепла**, которое отводится с корпуса и рассеивается в окружающую среду с помощью охладителей.

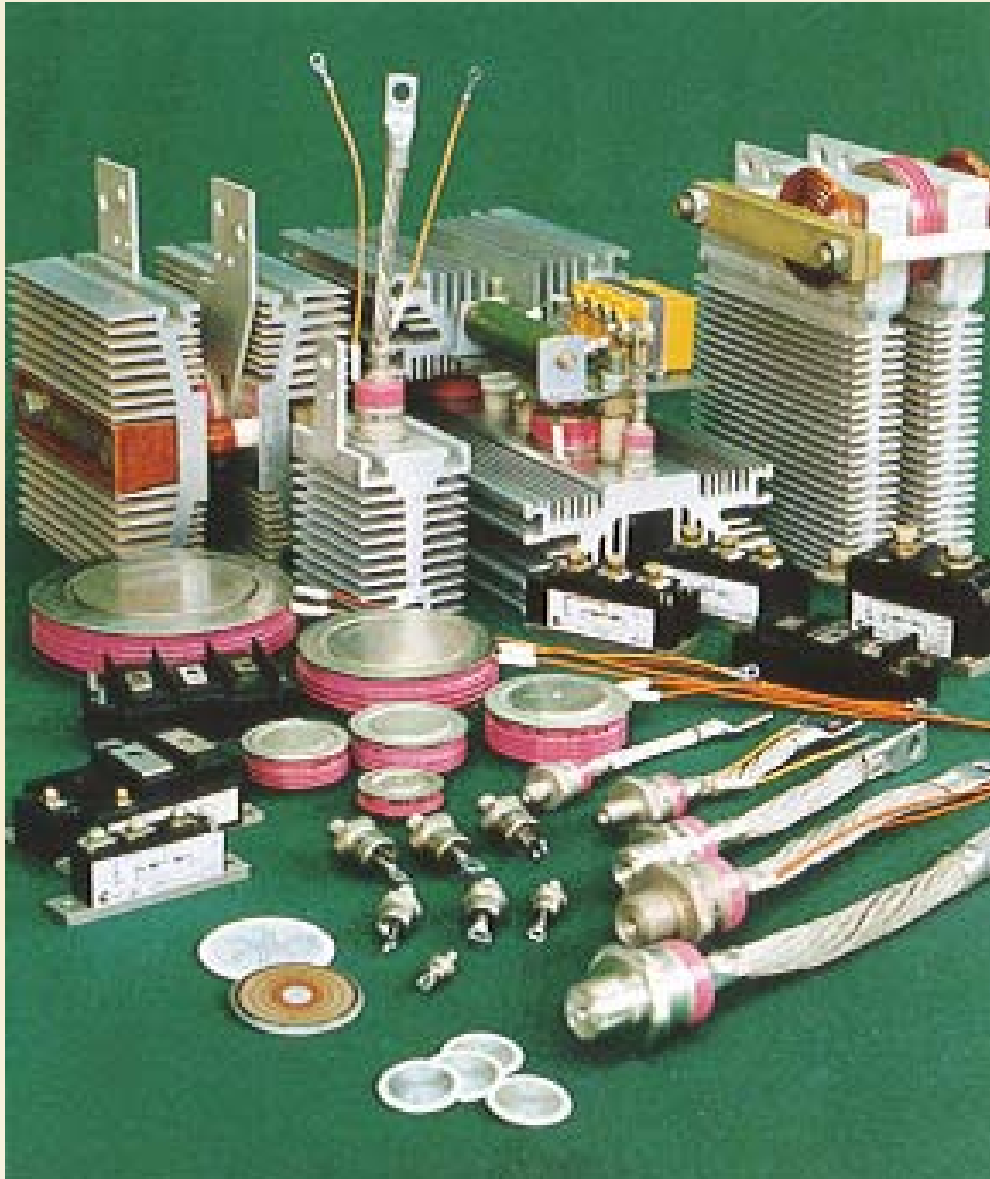
Качество охладителя характеризуется его **тепловым сопротивлением**. Чем меньше тепловое сопротивление охладителя, тем большую тепловую мощность можно отвести от прибора.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Наибольшее распространение получили охладители, изготовленные из **алюминия**, обладающие за счет ребер большой поверхностью охлаждения.

В качестве способов охлаждения СПП применяют чаще всего **воздушное**, а для тяжелых тепловых режимов – **водяное** охлаждение. Воздушное охлаждение может быть естественное и с принудительной циркуляцией воздуха, которое обеспечивается для повышения интенсивности охлаждения с помощью вентиляторов.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров



**Конструктивное
исполнение
силовых
полупроводниковых
приборов и их
охлаждаителей**

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

По назначению и области применения силовые полупроводниковые приборы подразделяются на низкочастотные, высокочастотные и быстродействующие.

К группе диодов относятся также стабилитроны и ограничители напряжения, а к группе тиристоров – фототиристоры и симметричные тиристоры (симисторы).

В зависимости от типа прибора они могут применяться в выпрямителях, инверторах, импульсных регуляторах, преобразователях постоянного и переменного тока, системах возбуждения генераторов и т. д.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Требования к условиям нормальной работы, монтажа и эксплуатации силовых полупроводниковых приборов содержатся в справочниках.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Условные обозначения силовых полупроводниковых приборов расшифровываются следующим образом:



буква В (вентиль) обозначает диод; Т – тиристор;
буква, обозначающая принадлежность прибора к определенной группе: Ч – высокочастотный; Б – быстродействующий; С – симметричный и т.д.;

обозначение модификации по размеру шестигранника для штырьевых приборов или по диаметру для таблеточных;

обозначение конструктивного исполнения корпуса;

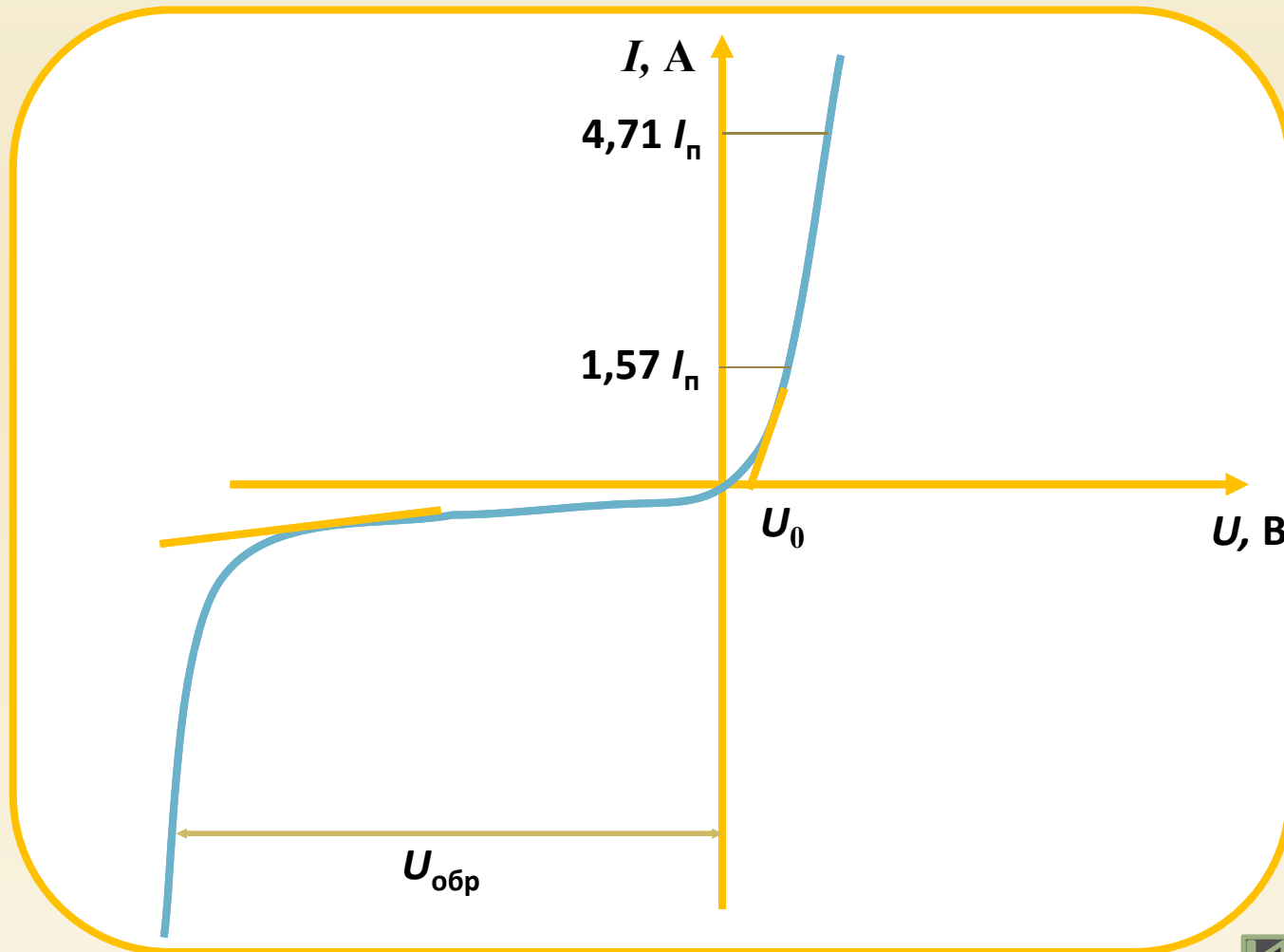
максимально допустимый средний прямой ток в открытом состоянии, А;

класс прибора по напряжению.

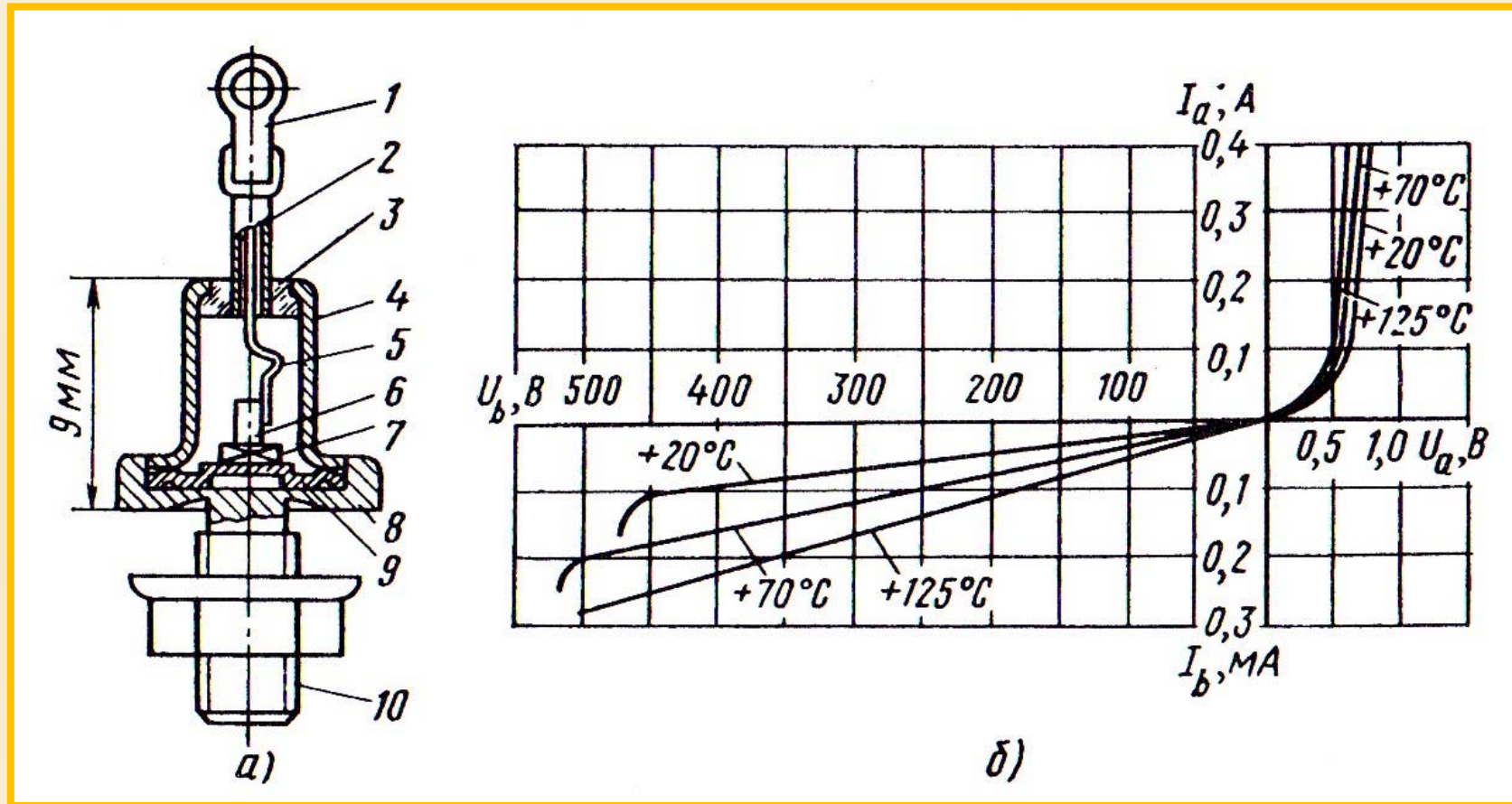
Пример маркировки прибора: ТЧ112 – 125 – 8 – тиристор высокочастотный на 125 А и 800 В.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Рассмотрим вольт-амперную характеристику
(**ВАХ**) неуправляемого силового вентиля.

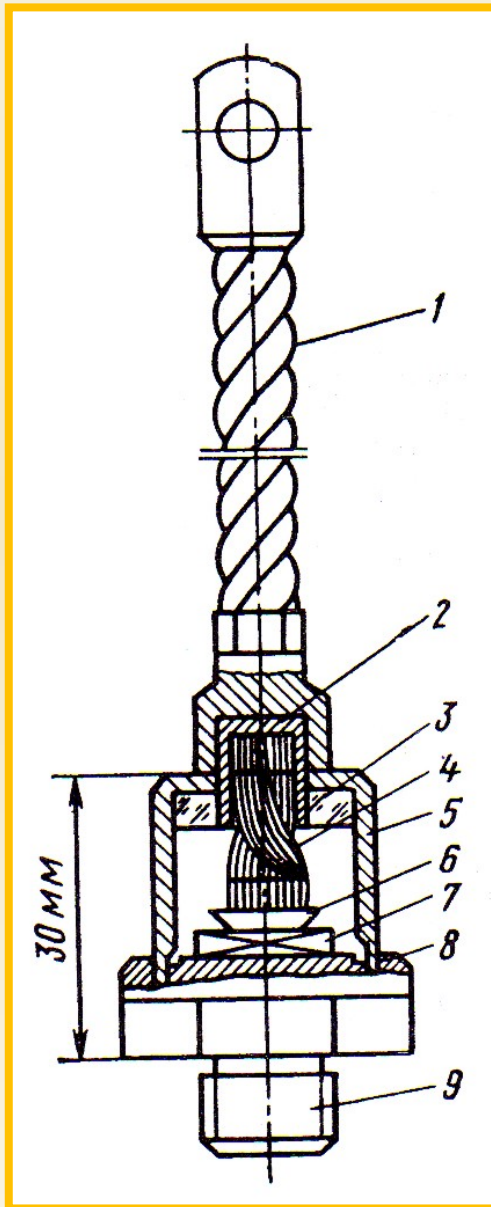


Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров



Д205 1- анод, 2 – трубка (штенгель), 3 – стеклянный изолятор, 4 – корпус, 5 – внутренний вывод анода, 6 – алюминий, 7 – кристалл кремния, 8 – теплоотводящее основание, 9 – кристаллодержатель, 10 - катод

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров



ВЛ-200 1- анод, 2 – стакан, 3 – стеклянный изолятор, 4 – внутренний гибкий вывод анода, 5 – корпус, 6 – чашечка, 7 – кристалл с р-п-переходом, 8 – кристаллодержатель (катод), 9 – шпилька для крепления к радиатору

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Обычно для упрощения расчетов используют **кусочно-линейную аппроксимацию** реальной ВАХ.

Для этого прямой участок характеристики, соответствующий проводящему состоянию вентиля, представляется отрезком прямой, выходящим из точки U_0 с наклоном, определяемым динамическим сопротивлением R_d .

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

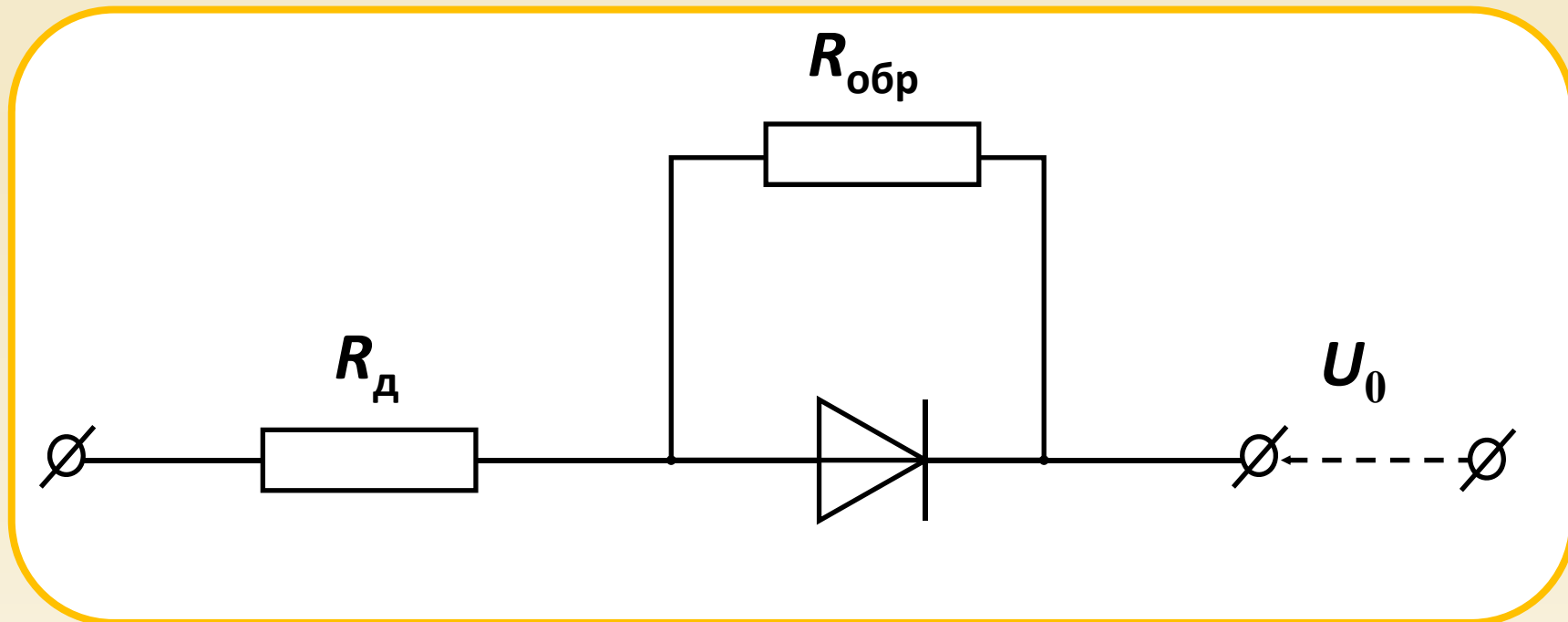
Графически построение линейной аппроксимации прямой ветви ВАХ осуществляется по точкам на реальной характеристике, соответствующим $1,57I_{\pi}$ и $4,71I_{\pi}$, где I_{π} – предельный ток вентиля.

Обратная ветвь характеристики аппроксимируется отрезком, выходящим из начала координат с наклоном

$$R_{\text{обр}} = \frac{dU_{\text{обр}}}{dI_{\text{обр}}}$$

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Кусочно-линейная **ВАХ** вентиля позволяет
составить его схему замещения



Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Значения параметров схемы замещения вентиля зависят от его типа, например, для силового диода **V 200** с предельным током $I_{п} = 200 \text{ А}$, $R_{д} = 70 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, $U_0 = 1,12 \text{ В}$ максимальный обратный ток не превышает **2 мА** при номинальном запирающем напряжении.

В зависимости от рекомендуемого рабочего напряжения прибору присваивается класс по напряжению. Классы для диодов начинаются с **0,5**, что соответствует напряжению **50 В**. При увеличении класса вентиля на единицу, его обратное напряжение возрастает на **100 В**.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Количественные соотношения между прямыми и обратными токами и напряжениями позволяют оценить качество работы вентиля по сравнению с идеальным, ВАХ которого совпадает с осями координат, а значения R_d , $U_0 = 0$, $R_{обр} = \infty$.

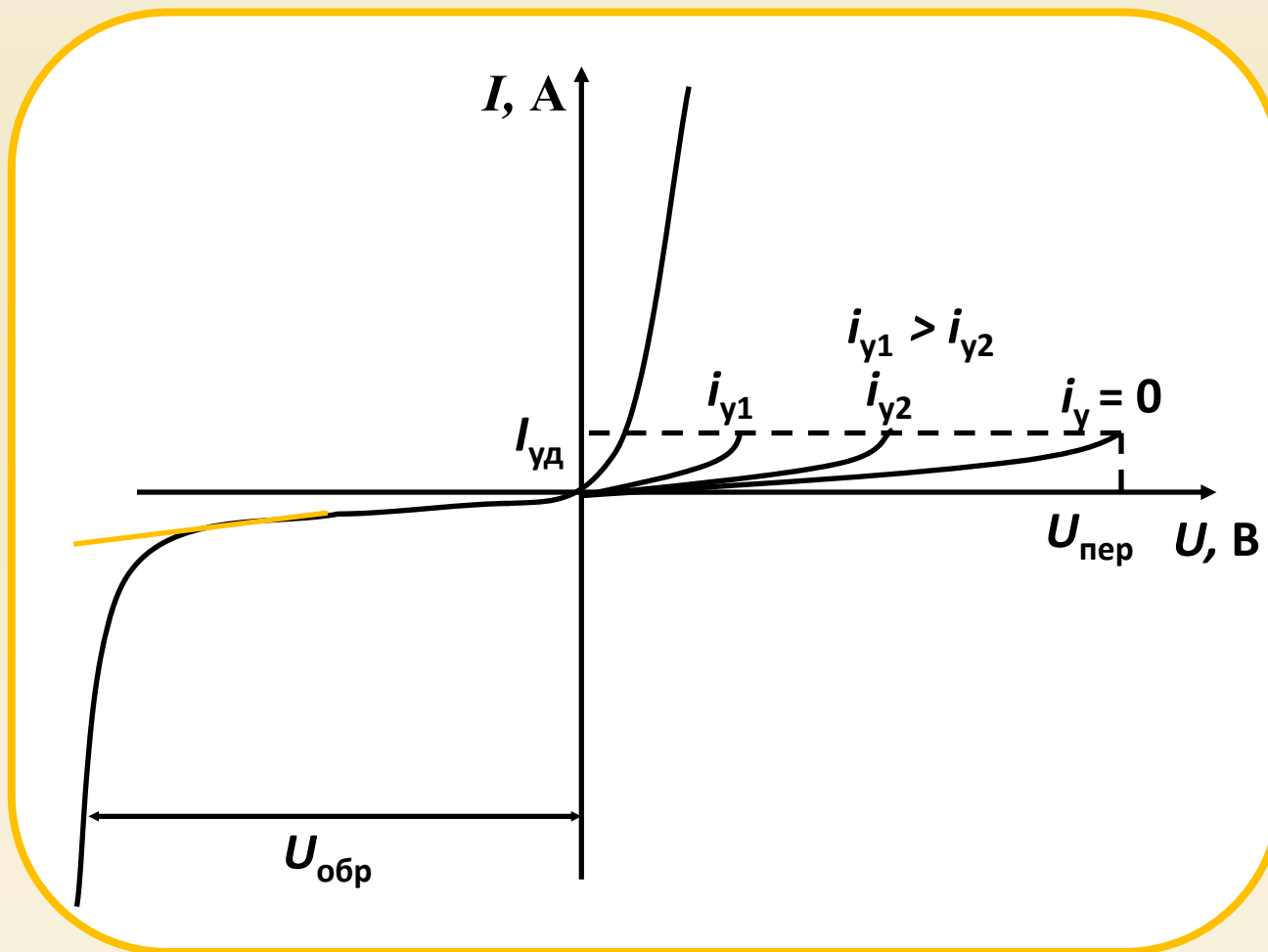
Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Тиристор – это прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями равновесия:

- ✓ состоянием с низкой проводимостью;
- ✓ состоянием с высокой проводимостью.

Переход из одного состояния равновесия в другое обусловлен действием внешних факторов: напряжения, света, температуры и др.

Вольт-амперная характеристика тиристора



Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

При отсутствии тока управления ($i_y = 0$) тиристор закрыт для напряжения любой полярности, если его величина не превосходит напряжение переключения $U_{пер}$.

Обычно величина $U_{пер}$ соответствует классу прибора по напряжению. В этом состоянии через тиристор протекают только прямой и обратный токи утечки.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

При подаче на управляющий электрод тиристора тока управления достаточной величины прямая ветвь ВАХ тиристора спрямляется и приобретает диодный вид. Ток управления в этом случае называется **током управления спрямления**. Как правило, тиристор используется как управляемый бесконтактный ключ, состояние которого определяется наличием или отсутствием управляющего сигнала. Поэтому в справочниках приводятся наименьшие значения тока управления I_y , при котором прибор переключается.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Выключается однооперационный тиристор только по цепи силовых электродов, когда его прямой ток станет меньше тока удержания $I_{уд}$. При работе в сети переменного тока тиристор выключается в момент перехода кривой его тока через нулевое значение. В этом случае коммутация тиристора называется *естественной*. В других случаях, когда тиристор необходимо выключить в произвольный момент времени, коммутация называется *искусственной*. Искусственная (или принудительная) коммутация осуществляется специальными схемами.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, тиристоров

Кроме однооперационных, существуют и полностью управляемые двухоперационные тиристоры. Эти полупроводниковые вентили отличаются тем, что их можно запереть подачей импульса тока обратной полярности в цепь управляющего электрода. Запирающий ток управления значительно больше отпирающего. Обычно величина коэффициента усиления по току при запираии не превышает **4–5**. По своим предельным мощностям запираемые тиристоры приближаются к однооперационным вентилям, а по частотным свойствам даже превосходят.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Другим, полностью управляемым, полупроводниковым элементом является транзистор.

Особенностью транзисторов, по сравнению с тиристорами, является необходимость наличия сигнала управления в течение всего времени его проводящего состояния.

Существуют различные типы транзисторов, основными из которых являются биполярные и полевые.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

Биполярные транзисторы представляют собой трехслойные полупроводниковые структуры *p-n-p* – или *n-p-n* – типов. Полевые транзисторы основаны на возможности управления проводимостью полупроводниковой структуры прибора с помощью электрического поля, прикладываемаемого к каналу проводимости в поперечном направлении.

Обычно в устройствах силовой электроники транзисторы используются в ключевом режиме работы, обеспечиваемом соответствующим управлением.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

По предельным мощностным характеристикам биполярные транзисторы на один– два порядка **уступают** тиристорам и соответственно превосходят их по частотным свойствам.

Полевые транзисторы по мощностным характеристикам заметно уступают биполярным, существенно превосходя их по частотному диапазону.

Характеристики и параметры силовых полупроводниковых приборов
(СПП): диодов, тиристоров

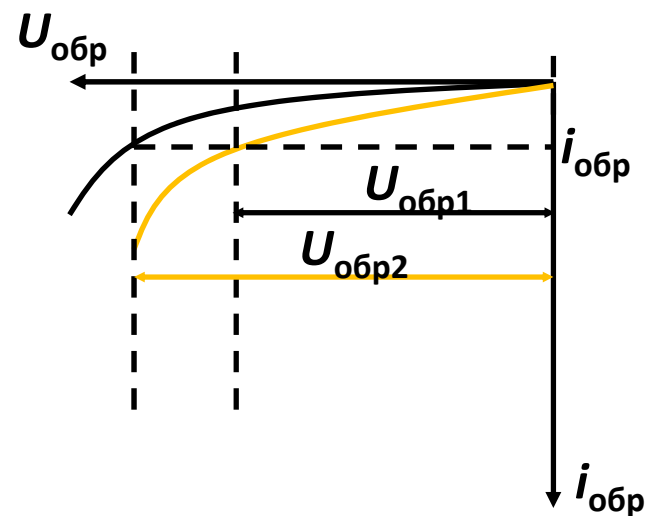
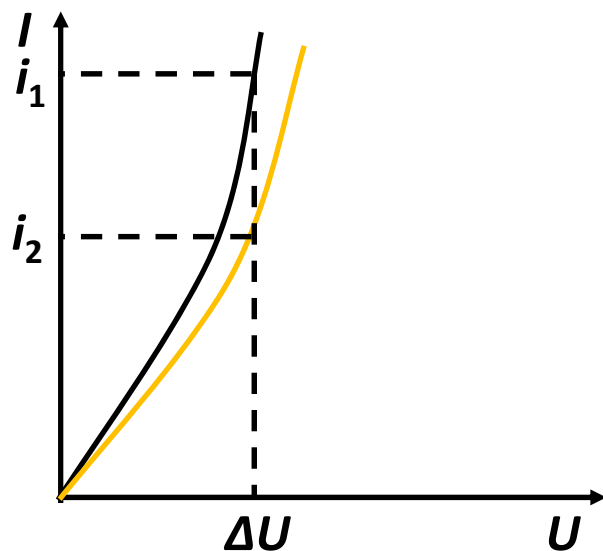
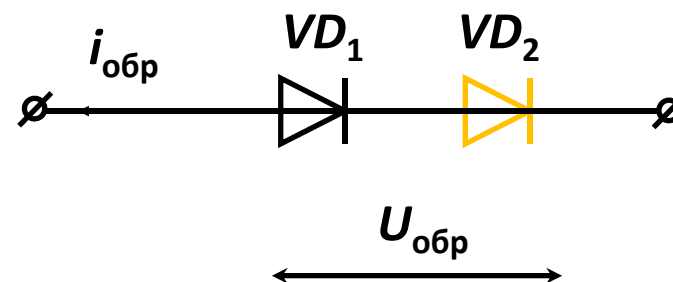
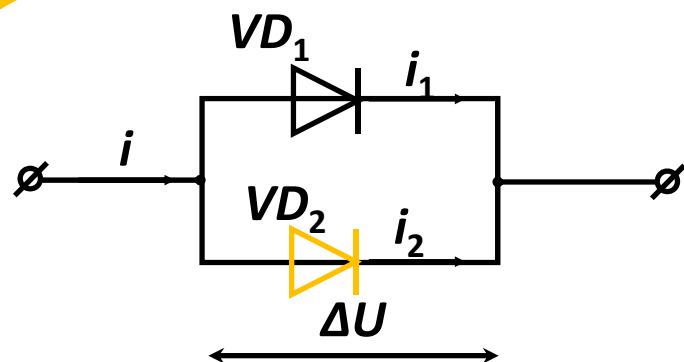
Сравнивая предельные мощностные характеристики различных типов силовых полупроводниковых приборов, отметим явные преимущества силовых диодов и однооперационных тиристоров.

Ориентируясь на изучение преобразователей электроэнергии в системах электроснабжения предприятий, электроэнергетических системах, в дальнейшем изложении материала основное внимание уделяется вентильным устройствам на базе тиристоров и диодов.

Для увеличения мощности, передаваемой СПП, часто используется **групповое соединение приборов**. Последовательное и параллельное соединение полупроводниковых приборов позволяет также повысить надежность вентиляционного преобразователя.

Неидентичность вольт-амперных характеристик СПП приводит к перегрузке **отдельных вентиляй по току** при параллельном соединении или по **напряжению** при последовательном соединении.

Групповое соединение полупроводниковых приборов



Групповое соединение вентиляей

Наиболее распространенным способом выравнивания токов между параллельно соединенными вентилями является включение последовательно с каждым вентилем дросселя, который уменьшает разброс параметров параллельных ветвей.

Выравнивание обратных напряжений последовательно соединенных приборов осуществляется включением параллельно каждому прибору шунтирующего резистора.

Тепловые потери, возникающие при работе приборов в электрической цепи, должны рассеиваться системой охлаждения так, чтобы максимальная температура полупроводниковой структуры не превысила максимально допустимое значение **120–140 °С**.

Система охлаждения вентиля предусматривает наличие охладителя, на который отводится тепло с корпуса прибора.

Воздушное охлаждение вентиля осуществляется естественным образом или устанавливаются вентиляторы для усиления интенсивности охлаждения. Для мощных СПП используется водяное охлаждение.

Мощность потерь, выделяющаяся в полупроводниковой структуре прибора, при прохождении по нему тока можно представить в виде суммы основных ΔP и дополнительных потерь $\Delta P_{\text{доп}}$:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P + \Delta P_{\text{доп}} .$$

При работе приборов на частоте, меньшей **400 Гц**, мощность **основных потерь** является **определяющей**, и **дополнительными потерями пренебрегают**. При больших частотах необходимо учитывать дополнительные потери, возникающие от обратного тока и от токов при включении и выключении прибора.

Мощность основных потерь определяется интегральными значениями прямого тока, протекающего через вентиль:

$$\Delta P = U_0 I_{\text{ср}} + I_{\text{д}}^2 R_{\text{д}},$$

где $I_{\text{ср}}$, $I_{\text{д}}$ – среднее и действующее значение токов вентиля. Для упрощения расчетов используется коэффициент формы $k_{\text{ф}} = I_{\text{д}} / I_{\text{ср}}$, который для известной формы тока вентиля позволяет легко определить действующее значение тока по известному среднему.

На частотах **до 400 Гц** расчет основных потерь в тиристоре можно производить по той же схеме замещения, что и для диода.

Для больших частот следует учитывать и дополнительные потери, которые для тиристора включают

- ✓ потери от прямого тока утечки,
- ✓ потери в цепи управления,
- а также
- ✓ дополнительные потери, учитываемые для неуправляемого вентиля.

Параметром, характеризующим тепловое состояние прибора и системы, является общее установившееся тепловое сопротивление $R_T = (\theta_{рп} - \theta_c) / \Delta P$. Тепловое сопротивление определяется как отношение превышения температуры структуры $\theta_{рп}$ над температурой окружающей среды θ_c , к мощности потерь ΔP , вызвавшей это превышение температуры.

Чебовский О. Р. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. – М. : Энергия, 1975.– 512 с.

Тепловой режим считается установившимся, если частота тока, протекающего через прибор, превышает **20 Гц**. Если это условие не выполняется, то тепловой режим прибора не является постоянным и характеризуется общим переходным тепловым сопротивлением

$$r_T = (\theta_{pnt} - \theta_c) / \Delta P$$

где θ_{pnt} – температура полупроводниковой структуры в момент времени t относительно начала работы прибора.

Переходные тепловые сопротивления, в отличие от установившихся, приводятся **в справочниках** в виде экспериментально снятых зависимостей при определенных условиях охлаждения.

Инженерная методика расчета рабочих режимов силовых полупроводниковых приборов предусматривает **эквивалентирование импульса мощности потерь произвольной формы импульсом прямоугольной формы**. Эквивалентирование осуществляется с учетом равенства площадей и амплитудных значений исходного и эквивалентного импульсов.

Тепловой расчет режима работы СПП заключается **в определении температуры** полупроводниковой структуры

➤ по известной мощности потерь

➤ либо в расчете максимально допустимой мощности потерь для заданной температуры полупроводниковой структуры при известных способах охлаждения.

В литературе приводятся расчетные соотношения, позволяющие определить температуру полупроводниковой структуры вентиля по известной мощности потерь или допустимую мощность ΔP при ограничениях на температуру θ_{rp} , для различных графиков нагрузки.

Схема замещения вентиля и его тепловые параметры позволяют проанализировать рабочий режим вентиля в конкретных условиях эксплуатации.

При расчетах электрических цепей с СПП часто пренебрегают их остаточными параметрами и считают **вентильные элементы идеальными**.

Это позволяет несколько упростить расчеты токов и напряжений в схеме. При необходимости выбора вентилей найденные значения токов и напряжений используются для определения мощности потерь для конкретного типа СПП с учетом его параметров U_0 , R_d , что позволяет провести анализ его теплового режима.

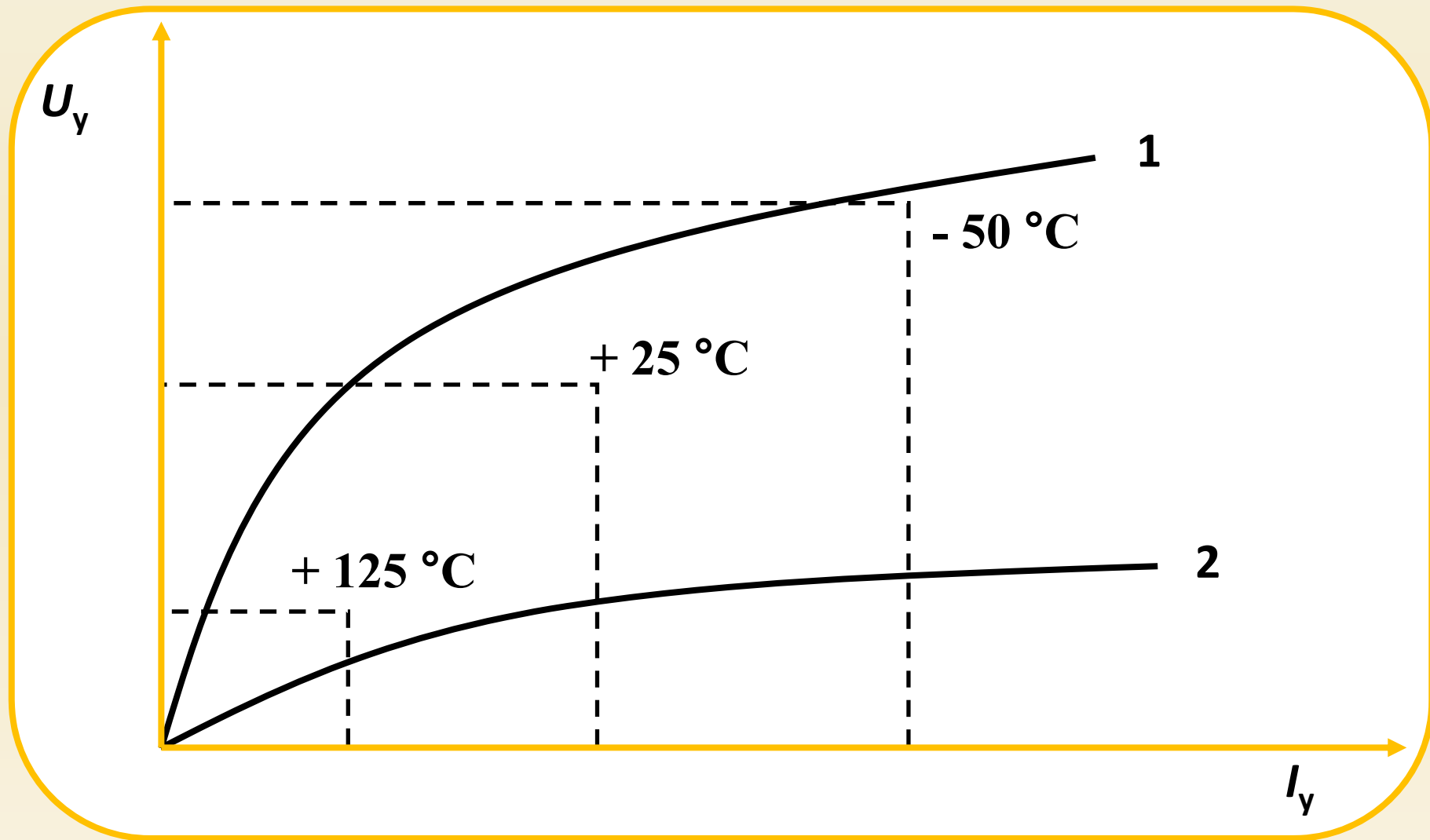
Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Для включения тиристора при условии, что на его анод подано положительное напряжение относительно катода, необходим отпирающий импульс определенной амплитуды, длительности и полярности.

Отпирающий импульс положительной полярности относительно катода подается на управляющий электрод.

Для отпирания тиристора постоянным током **величина управляющего сигнала** определяется по диаграмме управления, вид которой показан на рис.

Диаграмма управления тиристора



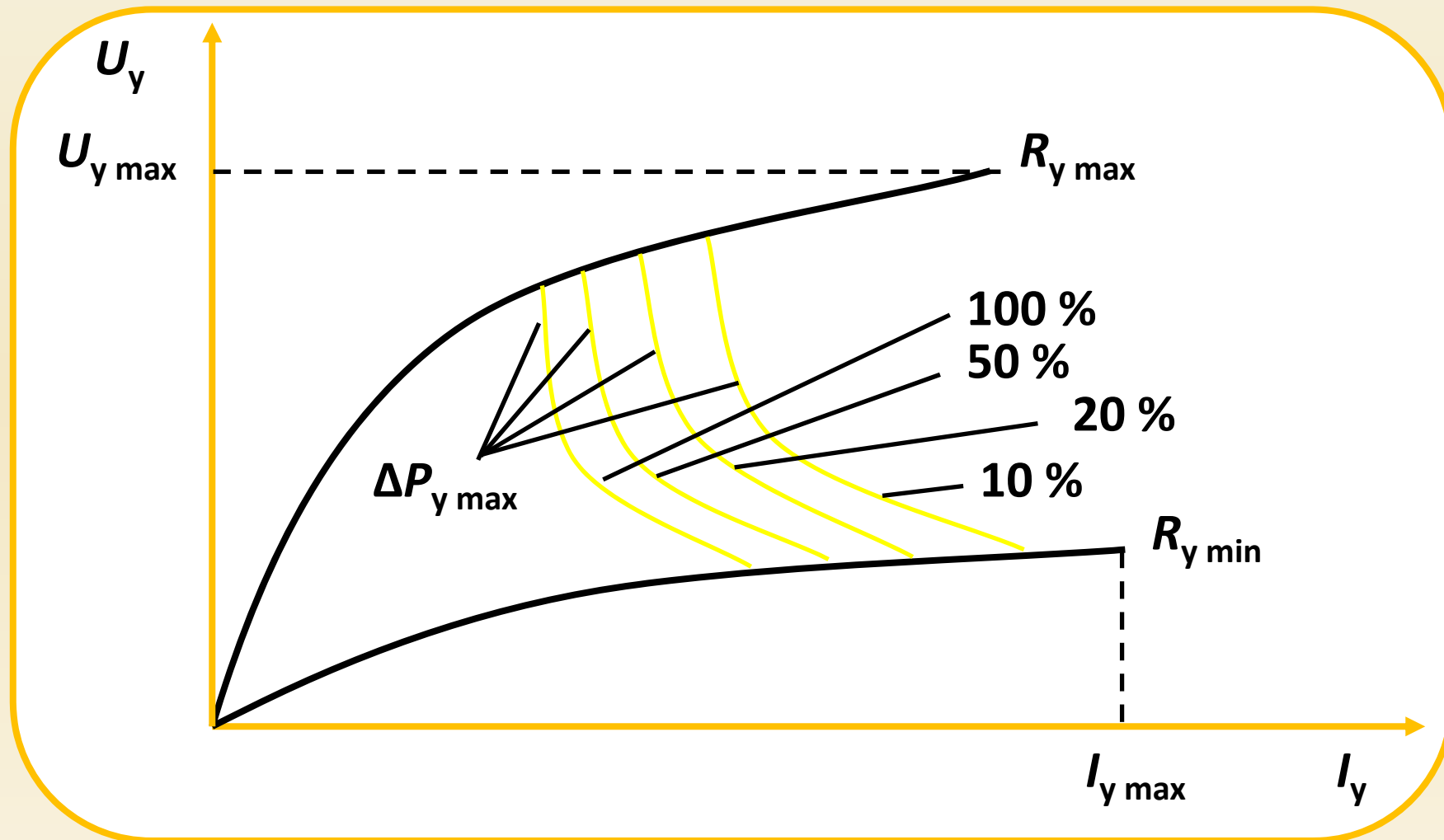
Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Кривая **1** соответствует входной ВАХ прибора с максимальным сопротивлением цепи управления; **2** – с минимальным. Сверху и справа диаграмма управления ограничена значениями отпирающих тока и напряжения при определенной температуре окружающей среды.

При импульсном управлении длительность отпирающего импульса связана с его амплитудой графической зависимостью, вид которой показан на рис.

Допустимая в импульсе мощность $\Delta P_{y \max}$, выделяющаяся в цепи управления тиристора, превышает допустимую мощность управления на постоянном токе ΔP_y . На рис. приведены кривые значений $\Delta P_{y \max}$ при относительной длительности импульса управления 10, 25, 50 и 100 %.

Входные характеристики цепи управления тиристора



Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Допустимая мощность рассеяния управляющего электрода при импульсном управлении определяется из выражения

$$\Delta P_{y \max} = \Delta P_y \frac{T}{t_y}$$

где T – период напряжения силовой цепи, мкс;

t_y – длительность импульса управления, мкс.

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

При выборе длительности импульса управления необходимо стремиться к возможно более **коротким** мощным импульсам с **крутым** фронтом. При этом **сокращается** время переключения тиристора и мощность коммутационных потерь. Особенно это важно для тиристоров с большими номинальными токами.

Нижний предел мощности определяется граничными значениями тока управления, при которых открываются все тиристоры данного типа. Верхний предел мощности ограничивается допустимой температурой нагрева четырехслойной структуры.



Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

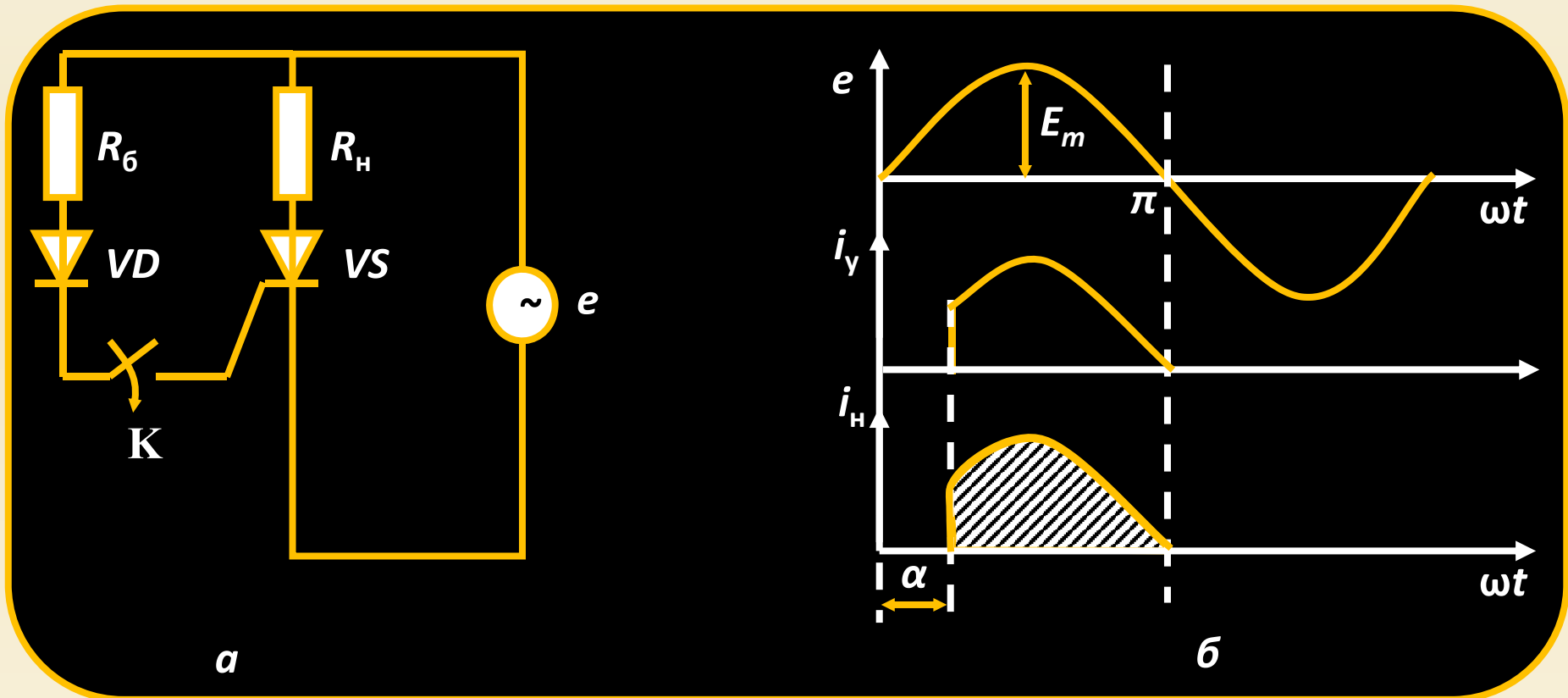
На практике для открытия тиристоров используются импульсы самой разнообразной формы: прямоугольной, треугольной, трапецеидальной и др.

Формировать управляющий сигнал для тиристора можно как от напряжения силовой цепи, так и с применением дополнительного источника питания.

В тиристорных коммутаторах переменного тока часто используется способ формирования управляющего сигнала из напряжения источника питания силовой цепи. Схема реализации данного способа показана на рис. **а**

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Способ формирования импульсов управления из напряжения силовой цепи



При замыкании ключа К в цепи управления протекает ток, мгновенное значение которого равно

$$i_y = \frac{E_m \sin \alpha}{R_б + r_d + r_{ум}}$$

где r_d – прямое сопротивление диода VD;

$r_{ум}$ – сопротивление цепи управления тиристора;

$R_б$ – балластное сопротивление, ограничивающее ток управления.

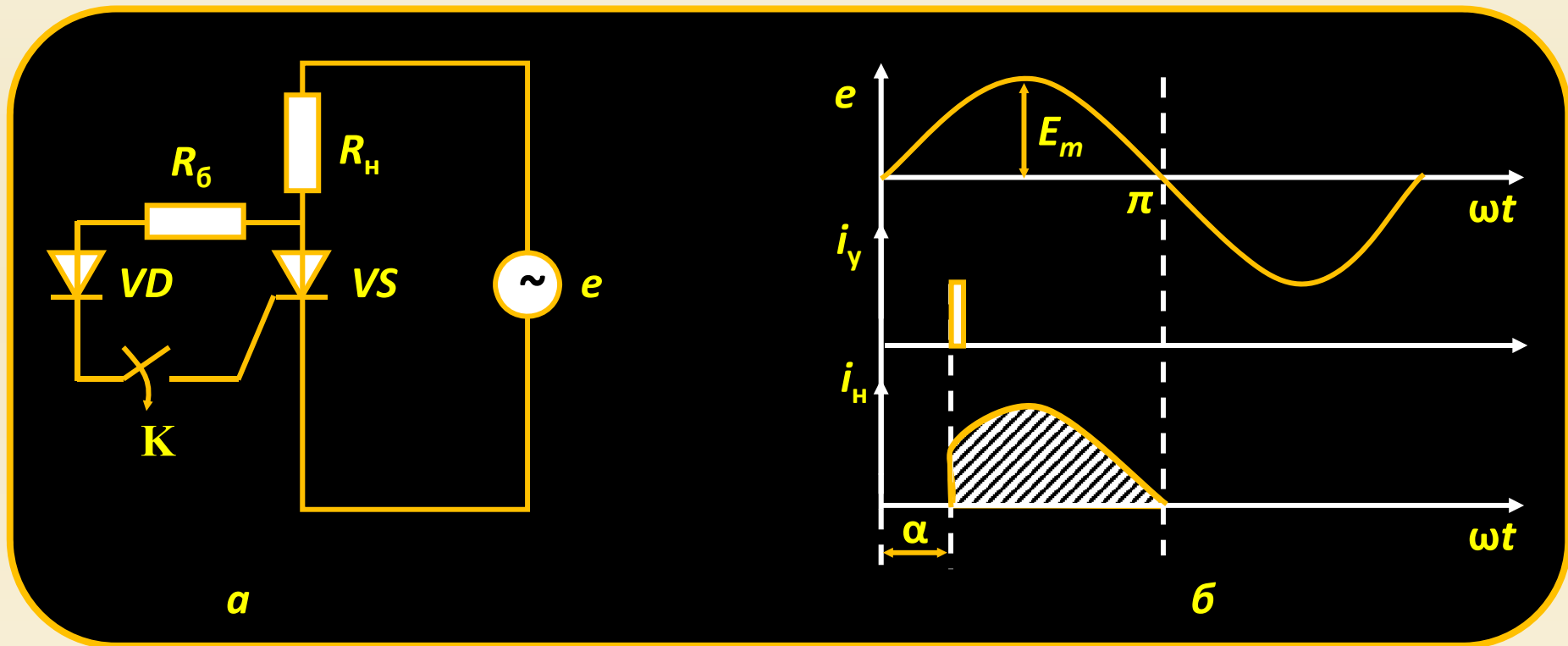
Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Сигнал управления в данной схеме длительный, перекрывающий положительный полупериод напряжения или большую его часть (рис. **б). В роли ключа К может быть контактный или бесконтактный элемент.**

Уменьшить мощность, выделяющуюся в цепи управления тиристора, позволяет способ формирования отпирающего сигнала из анодного напряжения тиристора (см. рис. ниже **а, б).**

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Способ формирования импульсов управления из анодного напряжения тиристора



От предыдущего данный способ отличается тем, что напряжение в цепи управления равно напряжению на тиристоре V_S . В момент включения тиристора напряжение управления равно напряжению питающей сети $U_y = e(t)$ без учета прямого тока утечки тиристора.

После включения тиристора напряжение управления падает до величины прямого падения напряжения на открытом тиристоре.

Тиристор включается коротким импульсом, длительность которого определяется временем включения $t_{\text{вкл}}$ тиристора при определенной величине тока управления $i_{y \text{ min}}$.

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Если ключ **K** был замкнут к началу очередной положительной полуволны e , то длительность импульса тока управления или угол включения α определяется как

$$\alpha = \frac{i_{y \min} (R_{\delta} + r_{\text{д}} + r_{\text{ум}})}{E_m}$$

где $i_{y \min}$ – минимальное значение импульса тока управления, обеспечивающего включение тиристора.

Короткий управляющий импульс **уменьшает** **мощность потерь** в цепи управляющего электрода. Данный способ включения достаточно надежен, так как управляющий сигнал не исчезает до момента включения тиристора.

Описанные способы формирования сигналов управления тиристором с использованием напряжения силовой цепи отличаются простотой схемных решений, не требующих дополнительного источника питания для управляющей цепи.

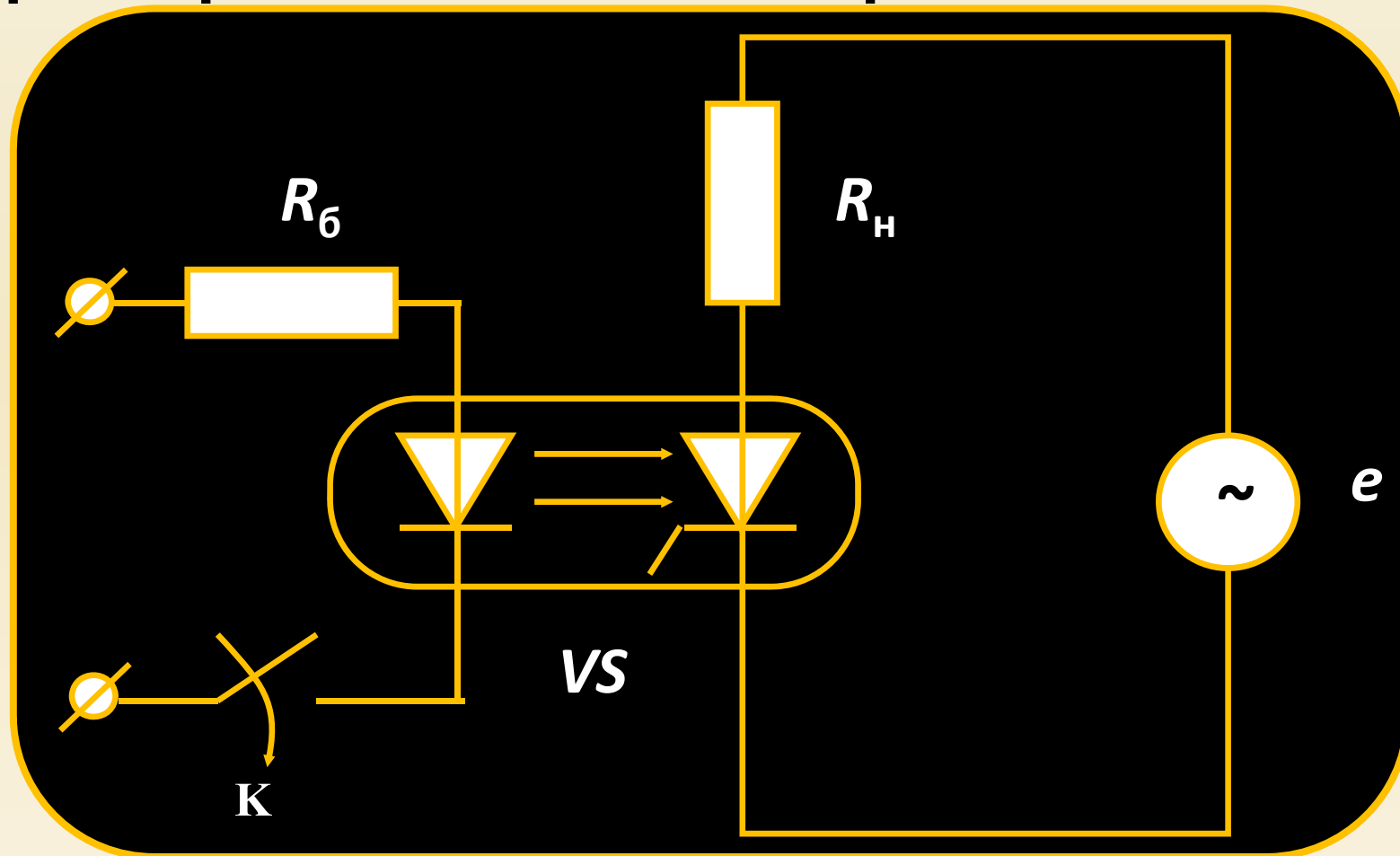
Недостатком данного способа является электрическая связь силовой цепи со схемой управления тиристором.

Этот недостаток устраняется при использовании фотоэлектрических преобразователей.

Вариант схемы с тиристорным оптроном показан на рис.

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Формирование импульса управления тиристором с помощью оптрона



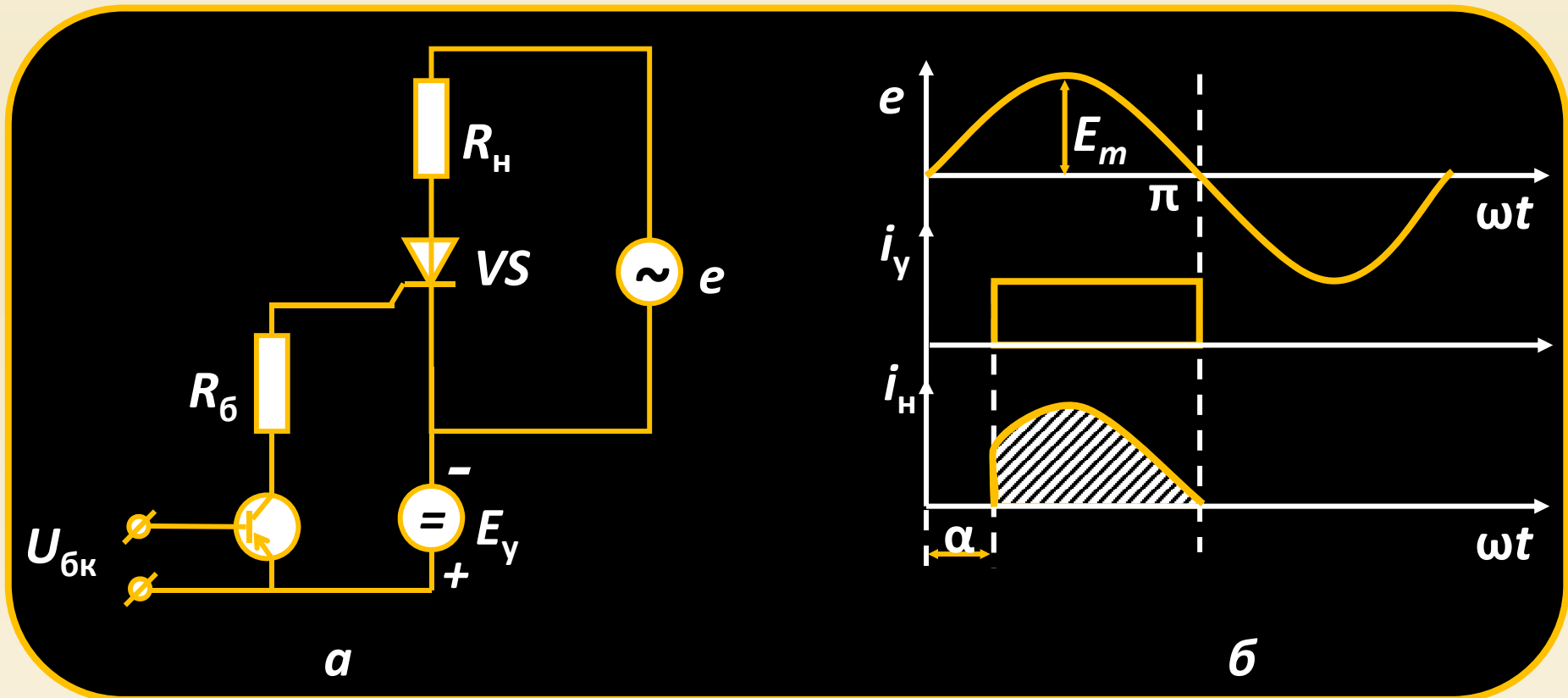
Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Вторым способом формирования сигналов управления тиристором является использование специального источника управляющих сигналов. Этот способ по схемной реализации может быть разделен на несколько вариантов.

Сигнал управления может быть сформирован в виде длительного сигнала постоянного тока по схеме, приведенной на рис. **а, б**.

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Формирование потенциального управляющего импульса для тиристора



Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Достоинством данного способа является простота и более широкие возможности подбора элементов цепи управления тиристором.

Недостаток – электрическая связь силовой цепи с цепью управления тиристором.

Устранить основной недостаток предыдущей схемы можно, если формировать управляющий сигнал в виде короткого импульса или серии высокочастотных импульсов.

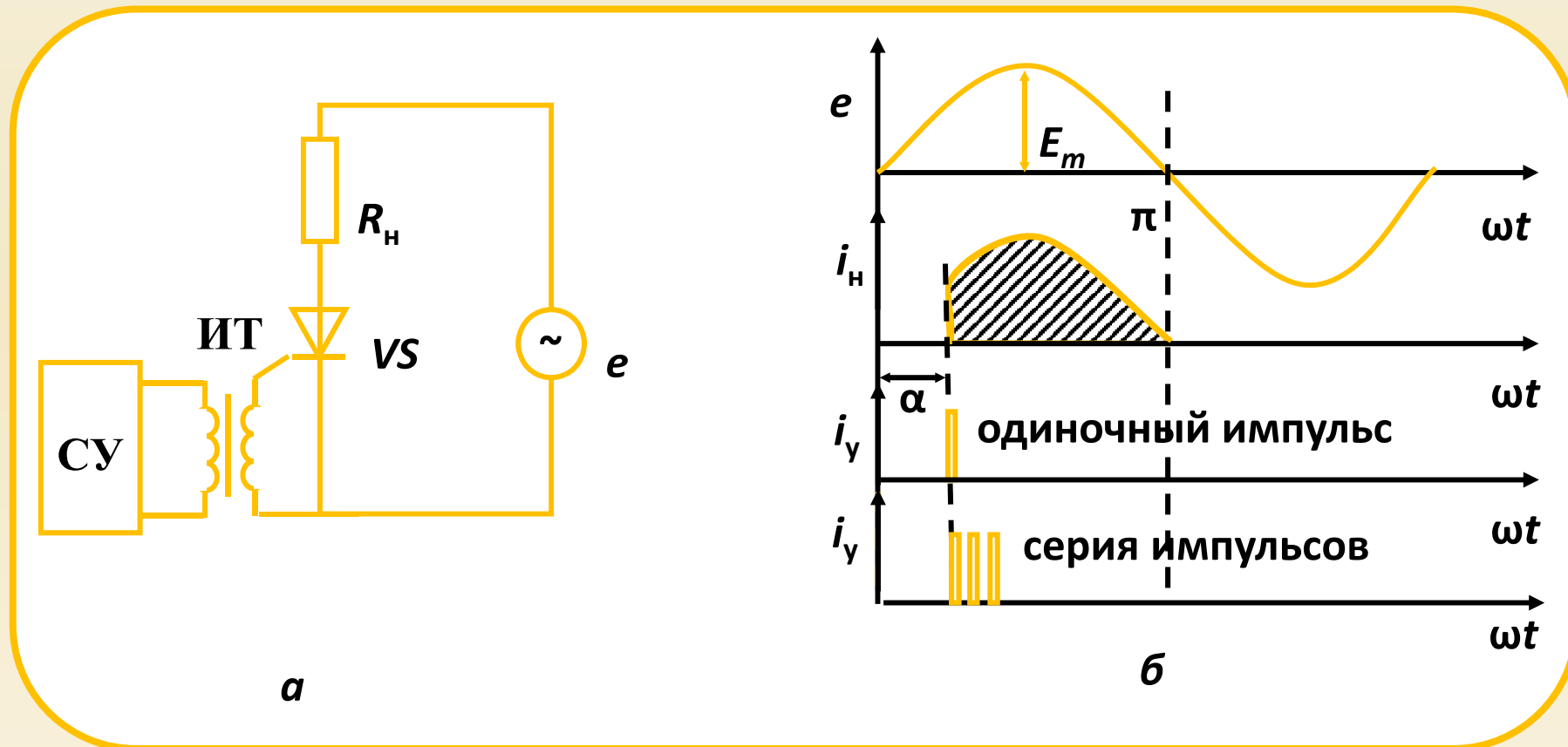
Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

В этом случае источник импульсных сигналов связывается с управляющим входом тиристора через импульсный трансформатор (ИТ).

Схема и временные диаграммы работы цепи управления показаны на рис. *а, б*.

Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Способ включения тиристора от источника импульсных сигналов



Способы формирования управляющих сигналов для тиристоров

Одиночный импульс тока управления в ряде случаев **не обеспечивает** достаточную надежность включения тиристоров. **Серия высокочастотных импульсов** повышает надежность включения. Частота импульсов серии выбирается достаточно высокой, обычно в киллогерцовом диапазоне, чтобы уменьшить погрешность угла включения тиристора, если отпирание происходит не первым импульсом серии.

Удобным схемным решением для связи источника управляющих сигналов с управляемым вентиляем является использование тиристорных оптронов.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Обычный однооперационный тиристор можно рассматривать как полууправляемый ключ. Тиристор **включается** по управляющему электроду, а **выключается** только по силовой цепи.

При работе в сетях переменного тока тиристоры выключаются при смене полярности прикладываемого к их силовым электродам напряжения. В этом случае говорят, что тиристоры работают с естественной коммутацией (**ЕК**).

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Для построения полностью управляемого тиристорного ключа необходимо применение специальных схем **искусственной коммутации** (ИК) с дополнительными коммутирующими элементами.

Обычно искусственная коммутация осуществляется за счет пропускания через тиристор обратного тока, благодаря чему ток через открытый тиристор уменьшается до величины меньшей тока удержания. Далее, на время запираания тиристора к нему прикладывается обратное напряжение.

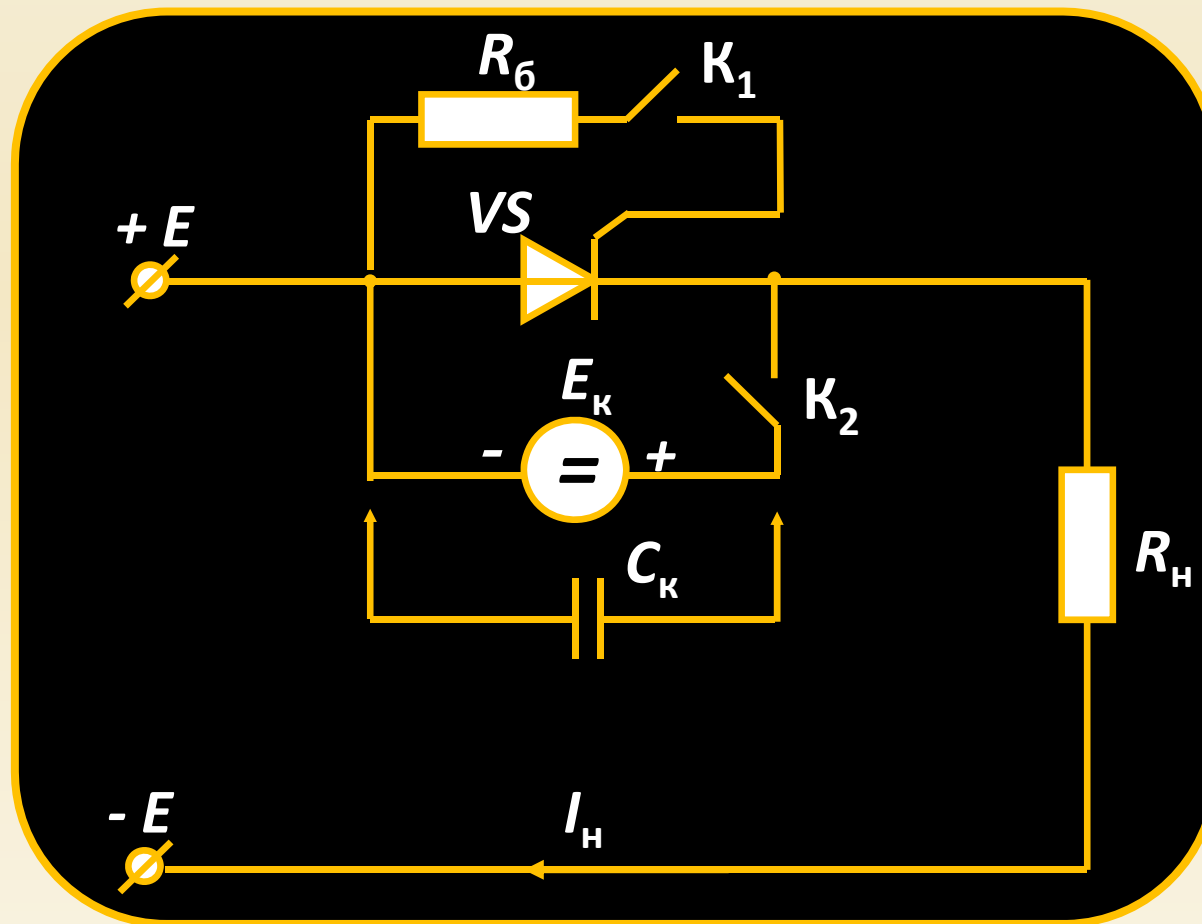
Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Обратные ток и напряжение создаются либо специальным источником питания, либо, в большинстве случаев, предварительно заряженным конденсатором.

Схема ИК тиристора с коммутирующим источником показана на рис.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Схема искусственной коммутации тиристора с коммутирующим источником



Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Включение тиристора VS осуществляется с использованием напряжения анодной цепи вентиля через коммутирующий элемент K_1 .

Выключение тиристора осуществляется током, обратным току нагрузки, создаваемым коммутирующим источником E_k .

Недостатком схемы является большая мощность E_k , который должен создавать запирающий ток, не меньший тока нагрузки I_H .

Для уменьшения мощности коммутирующего источника E_k используется конденсатор C_k , обеспечивающий кратковременный запирающий ток.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

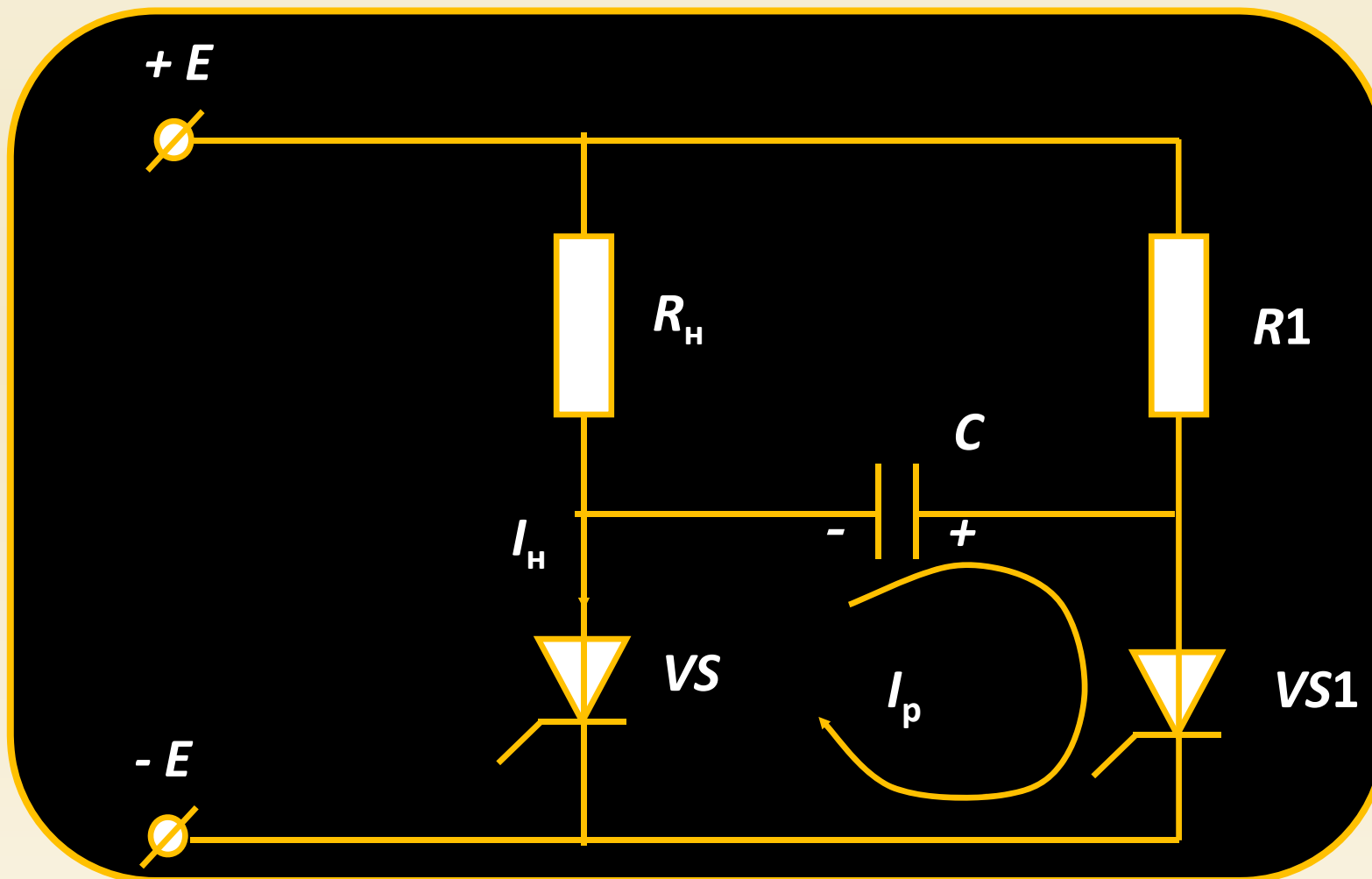
Заряд конденсатора осуществляется от источника E_k меньшей мощности (обладающего большим внутренним сопротивлением) в течение интервала времени, значительно превышающего длительность импульса разрядного тока, запирающего тиристор.

Часто вместо коммутирующего источника E_k используется напряжение силовой цепи тиристора.

Схема искусственной коммутации тиристора с емкостной коммутацией показана на рис.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Схема емкостной коммутации тиристора



Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

При включении основного тиристора VS , коммутирующего нагрузку R_H , емкость C заряжается по цепи $+E$, резистор $R1$, C , E .

Выключение нагрузки R_H осуществляется включением дополнительного тиристора $VS1$, подключающего заряженный конденсатор C параллельно VS . Ток разряда I_p через тиристор направлен встречно току нагрузки I_H , что приводит к принудительному выключению основного тиристора.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Резистор **$R1$** служит для ограничения тока заряда C и прямого тока через тиристор **$VS1$** .

В зависимости от величины **$R1$** данная схема может работать как полностью управляемый выключатель нагрузки **R_H** . Тогда сопротивление **$R1$** должно выбираться так, чтобы ограничивать ток через **$VS1$** до величины, меньшей его тока удержания. В этом случае (после разряда емкости) ток через тиристор **$VS1$** уменьшается и он закрывается.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Данная схема может работать и как бесконтактный переключатель двух нагрузок: R_H и $R1$. Включение любого из тиристоров (VS или $VS1$) приведет к принудительному выключению другого разрядным током коммутирующего конденсатора C .

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Величина емкости коммутирующего конденсатора C определяется в зависимости от тока нагрузки I_H , времени выключения тиристора $t_{\text{ВЫК}}$ и напряжения на коммутирующем конденсаторе по формуле

$$C_K \geq (1 \div 1,4) \frac{I_H t_{\text{ВЫК}}}{U_c}$$

Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов /под ред. Г. И. Александрова. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Следует отметить, что имеется большое количество схем искусственной коммутации тиристоров.

Тиристоры позволяют создавать **бесконтактные ключи** переменного и постоянного тока, отличающиеся большим сроком службы и высокой надежностью. Это объясняется статичностью их конструкции и практически отсутствием износа при эксплуатации.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Надежность и срок службы бесконтактных устройств определяется старением их компонентов. В период нормальной эксплуатации надежность СПП весьма высока. Важнейшей характеристикой коммутатора является быстроедействие. Тиристор имеет время включения порядка десятков микросекунд, что позволяет создавать коммутирующие устройства со временем включения не более **0,001 с.**

Поскробко А. А., Братолобов В. В. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. – М. : Энергия, 1978. – 192 с.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

Время выключения тиристора с естественной коммутацией определяется в основном частотой сети переменного тока и составляет величину порядка половины его периода. Искусственная коммутация позволяет уменьшить время выключения СПП. Такие параметры быстрого действия тиристоров позволяют создавать коммутационную аппаратуру, существенно превосходящую электромагнитные контакторы, имеющие время включения порядка 0,04 с, выключения – 0,02 с.

Естественная и искусственная коммутация тиристоров, основные схемы искусственной коммутации.

К основным недостаткам бесконтактных полупроводниковых ключей относятся:

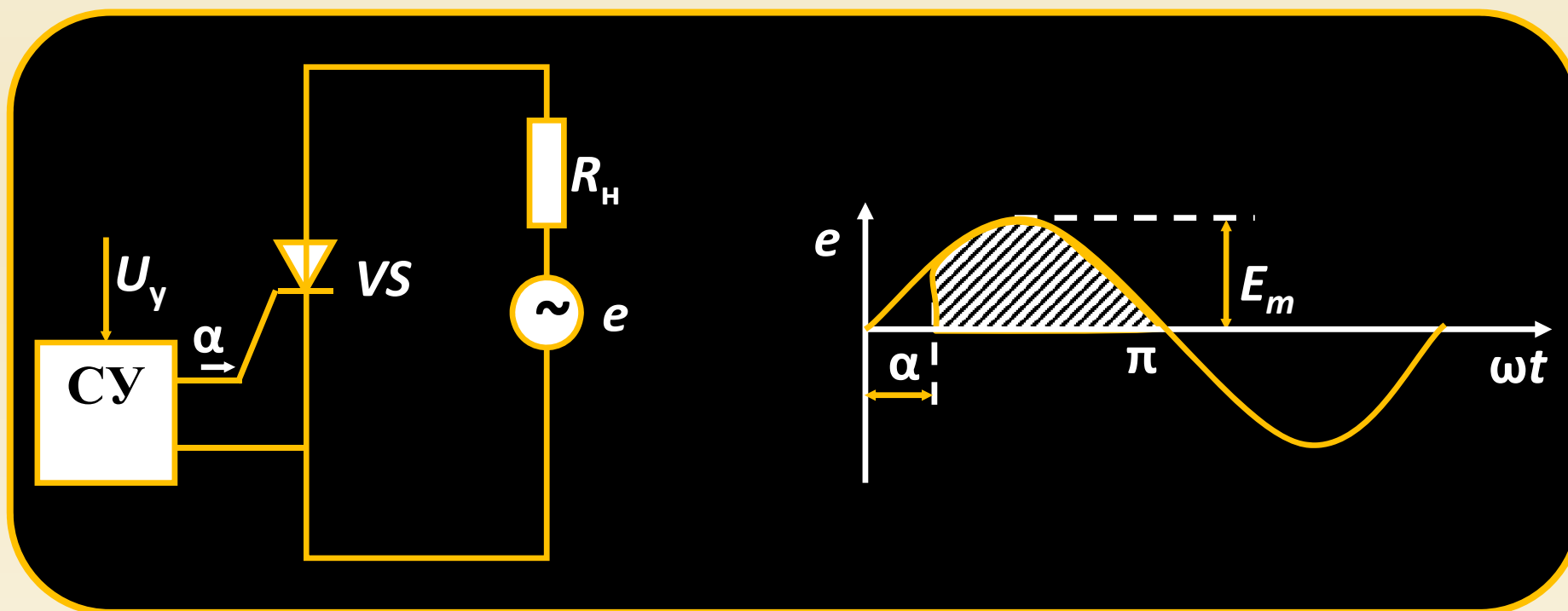
✓ **малая перегрузочная способность и**

✓ **худшие остаточные параметры по сравнению с контактными аппаратами (сопротивления во включенном и выключенном состояниях).**

Фазорегулируемые тиристорные усилители обеспечивают плавное регулирование выходных параметров.

Принцип действия простейшего усилителя поясняется рис.

Принцип действия фазорегулируемого тиристорного усилителя



Способы фазового регулирования тиристорных устройств

Суть фазового регулирования угла управления тиристора состоит в задержке на угол α момента отпирания тиристора относительно его точки естественной коммутации.

Эту задачу решает специальная система управления (СУ), работа которой синхронизирована с напряжением сети e .

Для рассматриваемого случая среднее значение напряжения на нагрузке равно

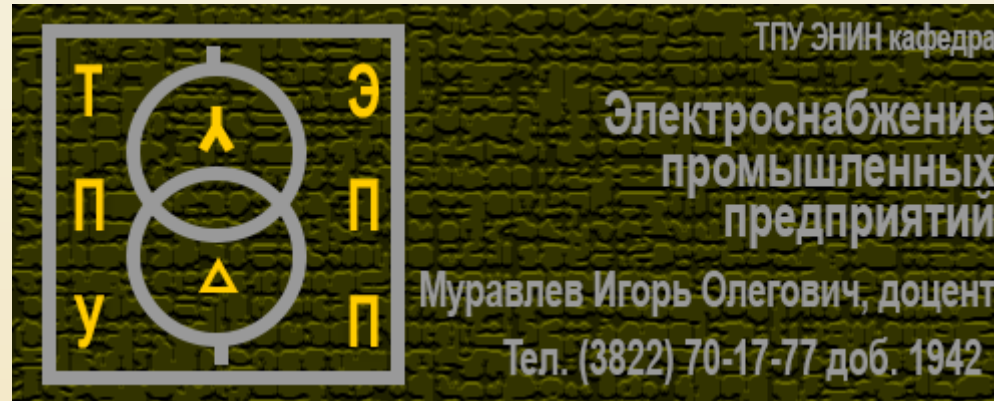
$$U_{\text{нсп}} = \frac{1}{T} \int_0^{\pi} U(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha} 0 dt + \int_{\alpha}^{\pi} E_m \sin \omega t \cdot dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right] = U_{\text{нсп}}(\alpha)$$

Очевидно, что приращению угла управления α , вызванного приращением управляющего напряжения ΔU_y , соответствует некоторое изменение напряжения на нагрузке на величину $\Delta u_{\text{нсп}}$.

Следовательно, несмотря на практически бесконечно большую величину коэффициента усиления собственно тиристора (обычно такой параметр не рассматривается), фазорегулируемые тиристорные устройства обладают вполне конкретными значениями коэффициента усиления –

$$k_y = \Delta U_H / \Delta U_y$$

который определяется схемой управления СУ.



Кафедра
**Электроснабжение промышленных
предприятий**