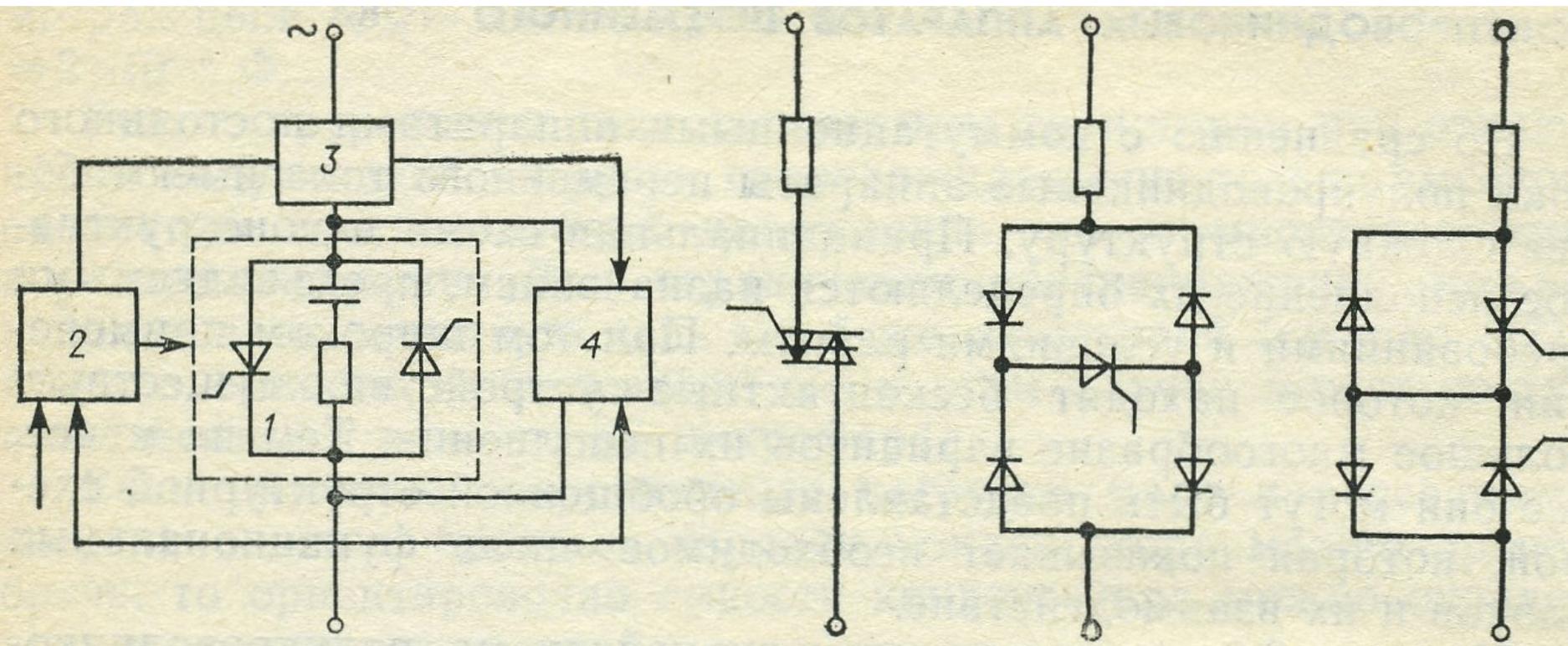


Полупроводниковые электрические аппараты

Лектор: проф. д.т.н. Фролов
Владимир Яковлевич

Выключатели переменного тока



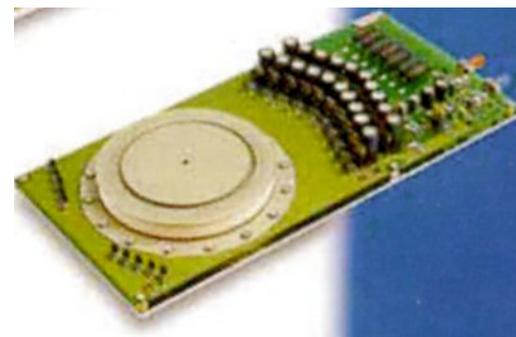
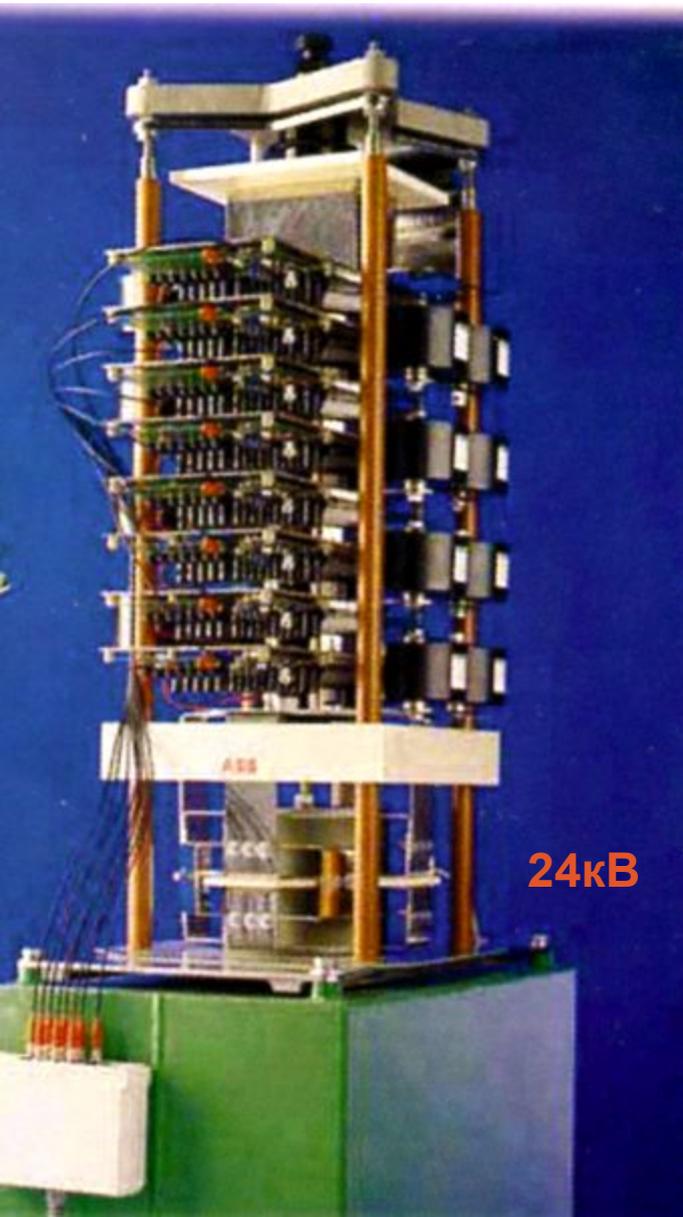
Основные разделы курса

- Параметры и характеристики полупроводниковых приборов.
- Коммутационные характеристики электронных аппаратов переменного и постоянного тока
- Комбинированные контактно-электронные аппараты
- Системы управления электронными и комбинированными аппаратами

Литература

- Полупроводниковые электрические аппараты: Учебное пособие для вузов/Г.А. Кукеков, К.Н.Васерина, В.П.Лунин. – Л.: Энергглатомиздат. 1991г.
- Электрические электронные аппараты: Учеб. Для вузов /Под ред. Ю.К. Розонова/, М.: Энергоатомиздат, 1998г.

Полупроводниковые ключи



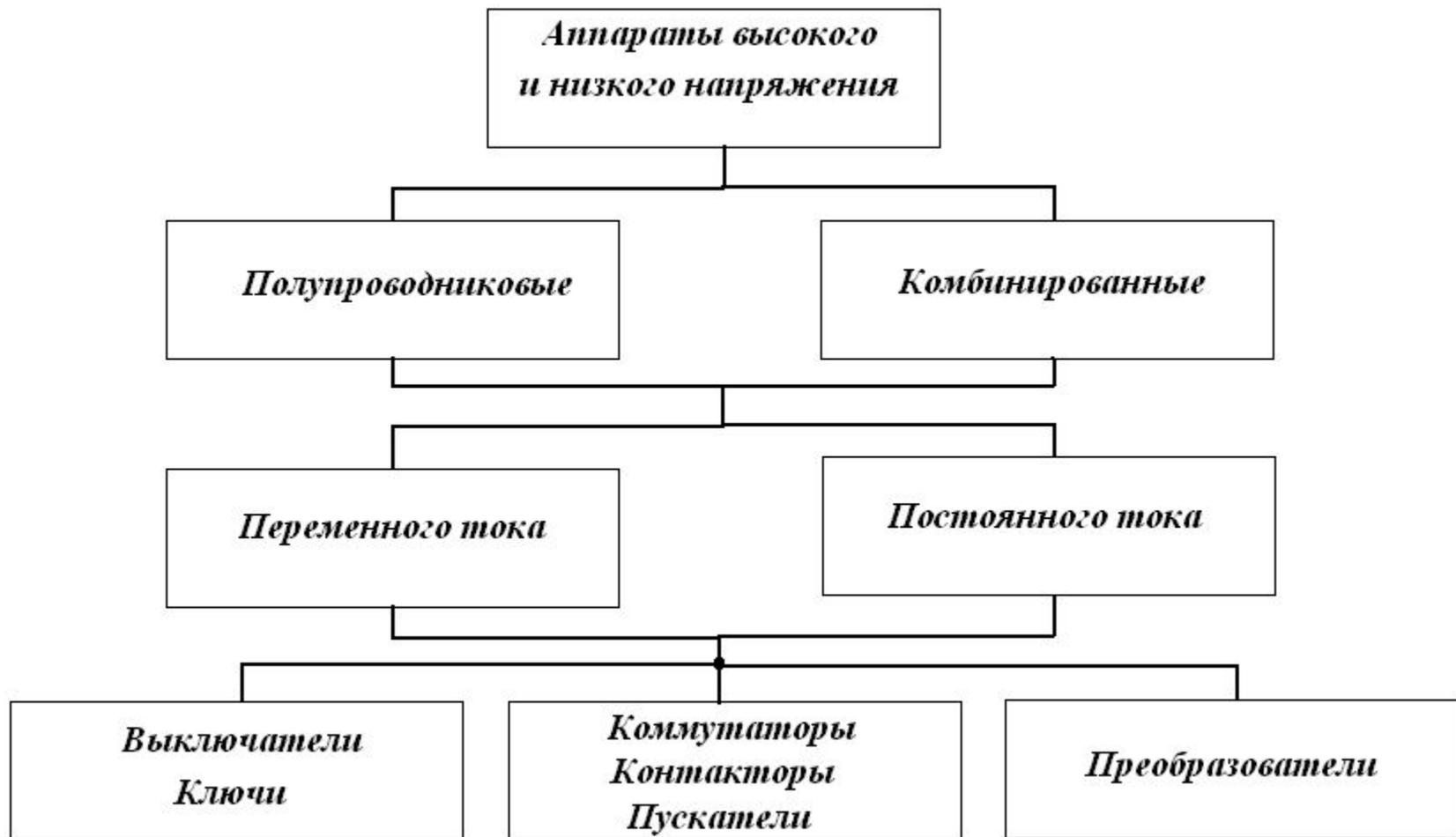
Преимущества ПА

- Два устойчивых состояния: проводящее и непроводящее
- Быстрый переход из одного состояния в другой по команде
- Бездуговая коммутация электрических цепей
- Повышенный срок службы аппаратов с коммутацией номинального тока более 10^7 раз
- Отсутствие подвижных частей (контактов), приводных устройств и механизмов
- Отсутствие эрозии, шума, выбросов газа
- Многофункциональность, частота коммутаций

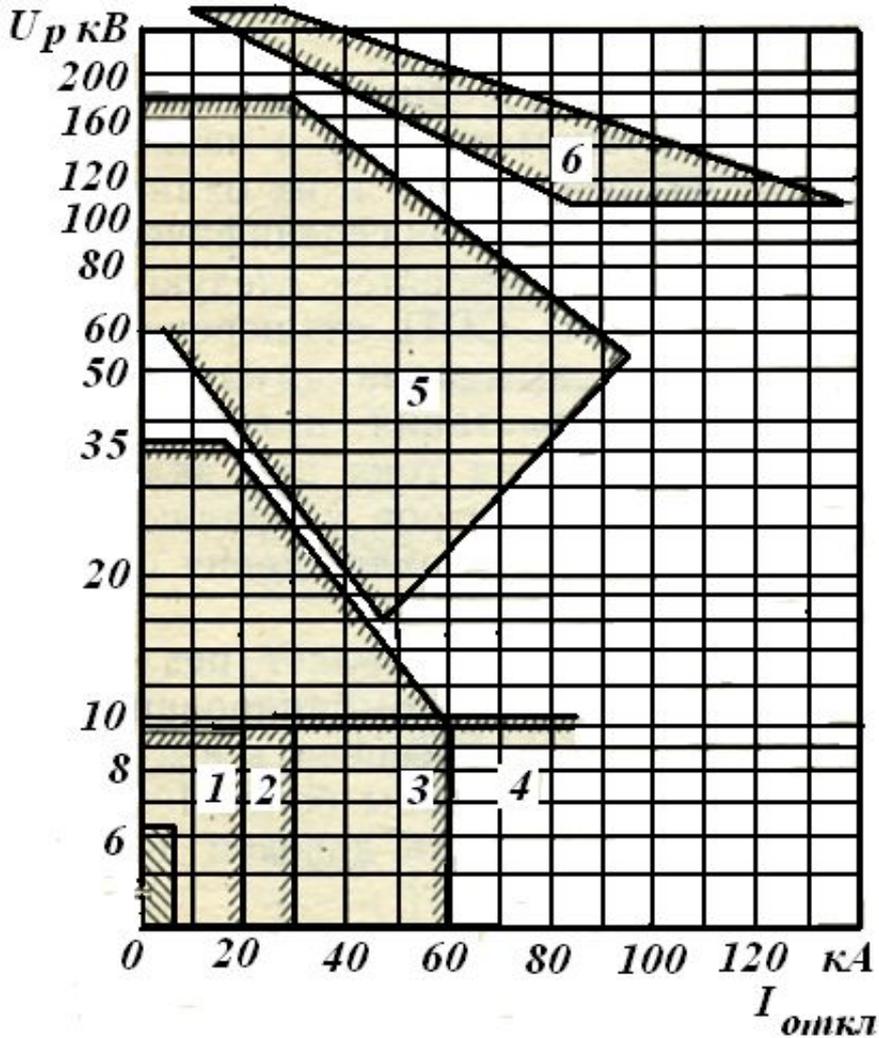
Недостатки ПА

- Выдерживают меньшие перегрузки по току
- Чувствительны к перенапряжениям
- Значительные потери полупроводниковых приборов во включенном состоянии
- Значительный рост стоимости с увеличением номинальных значений тока и напряжения

Классификация ПА



Области применения ПА

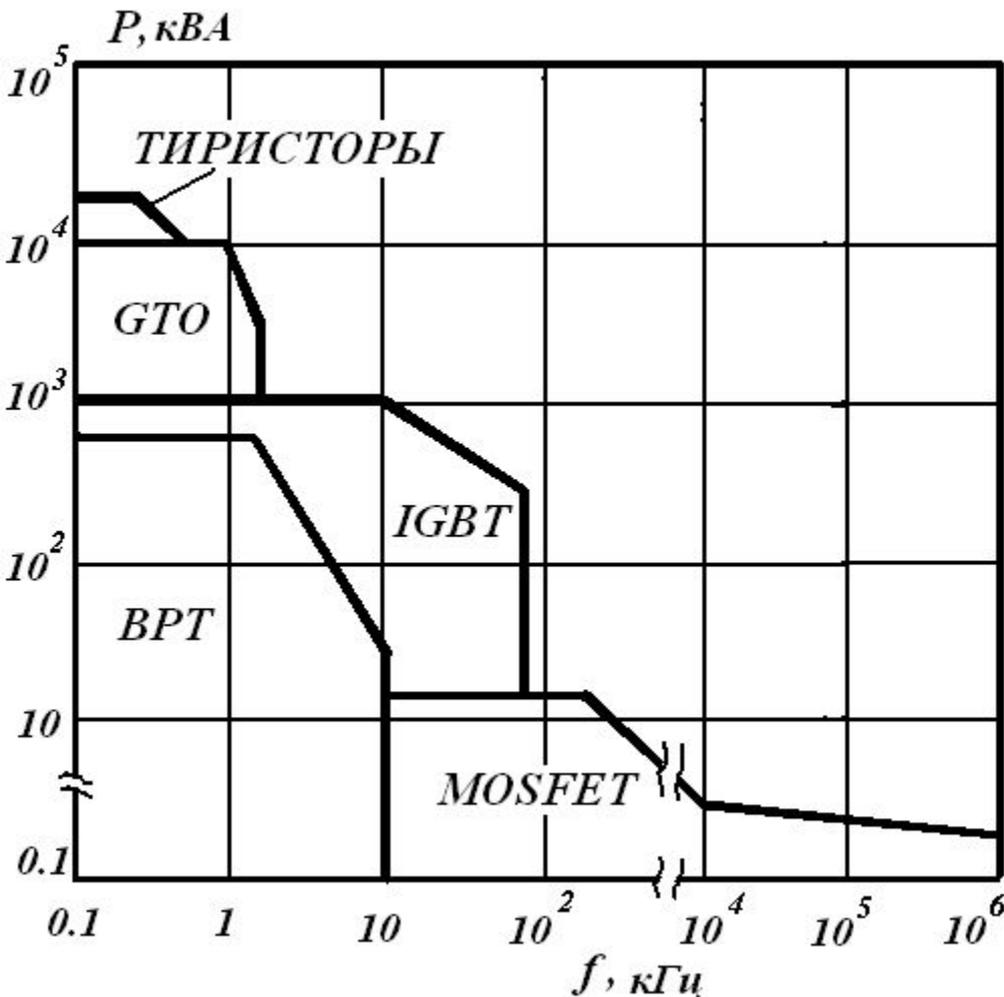


1- 4 – области применения полупроводниковых и комбинированных аппаратов

5 - области применения вакуумных выключателей

6 – области применения элегазовых выключателей

Области применения полупроводниковой элементной базы в зависимости от частоты



GTO (GCO) – запираемые тиристоры (Gate Commutated Thyristor)

BPT – биполярные транзисторы

MOSFET - транзистор с изолированным затвором (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Thyristor)

IGBT - биполярный транзистор с изолированным затвором (Isolated Gate Bipolar Thyristor), полевой + биполярный транзисторы

Энергетические показатели качества электромагнитных процессов

- Коэффициент преобразования (транспортирования) эл. энергии:

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}, \quad K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$$

- Коэффициент искажения тока и напряжения:

$$v_i = I_{(1)} / I, \quad \text{где } I_{(1)} \text{ – действующее значение первой гармоники тока}$$

- Коэффициент сдвига тока отн. напряжения по 1-й гармонике:

$$\cos \phi_{(1)} = P_{(1)} / \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}$$

- Коэффициент мощности:

$$\chi = P/S = [EI_{(1)} \cos \phi_{(1)}] / EI = v_i \cos \phi_{(1)}$$

- Коэффициент полезного действия:

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

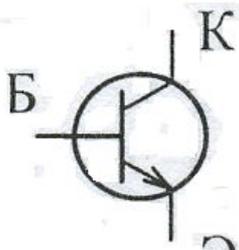
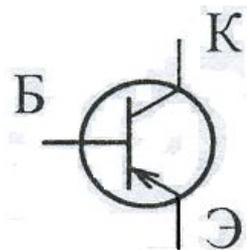
- Энергетический коэффициент полезного действия:

$$\eta_{\text{Э}} = P_{\text{ВЫХ}} / S_{\text{ВХ}} = \chi \eta$$

- Удельные потери мощности: $q = (P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}) / S$

Характеристики и параметры полупроводниковых приборов

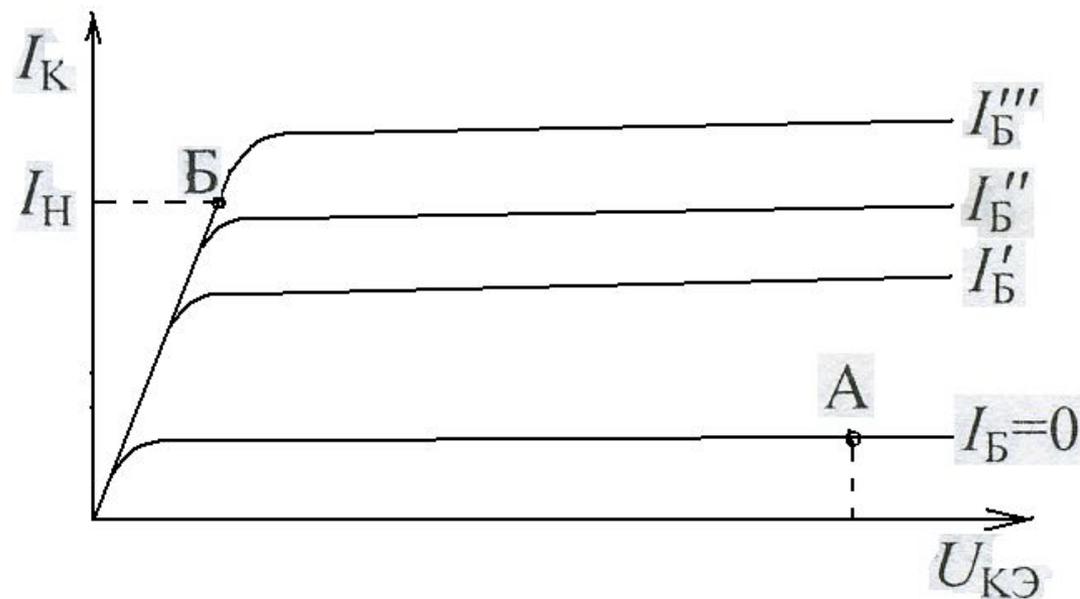
Биполярные транзисторы. Принципиальным отличием является то, что для них необходимо наличие сигнала управления в течение всего времени прохождения через транзистор тока. Предельные эл. параметры транзистора зависят от его типа. Проводимость электронная и дырочная.



p-n-p-типа

n-p-n-типа

Ток – сотни ампер,
Напряжение – сотни вольт
Частота – единицы кГц

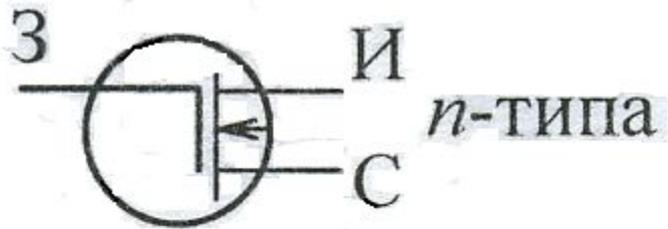


Б – рабочая точка, при этом ток базы не меньше - I_B'''
А – транзистор выключен

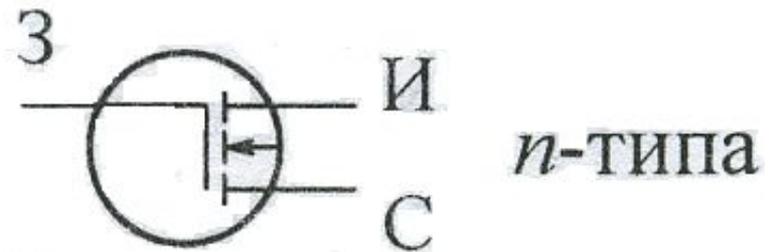
Полевые транзисторы с изолированным затвором - MOSFET

Принципиальным отличием является один тип носителя тока. Проводимость модулируется с помощью электрического поля, прикладываемого к каналу в поперечном направлении посредством электрода – затвора.

Со встроенным каналом:



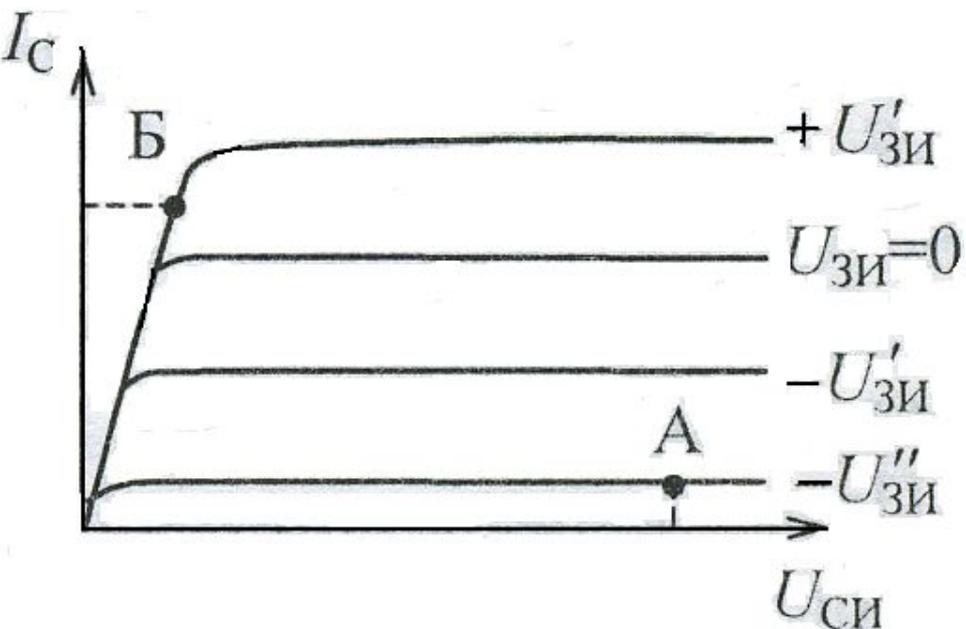
С индуцированным каналом:



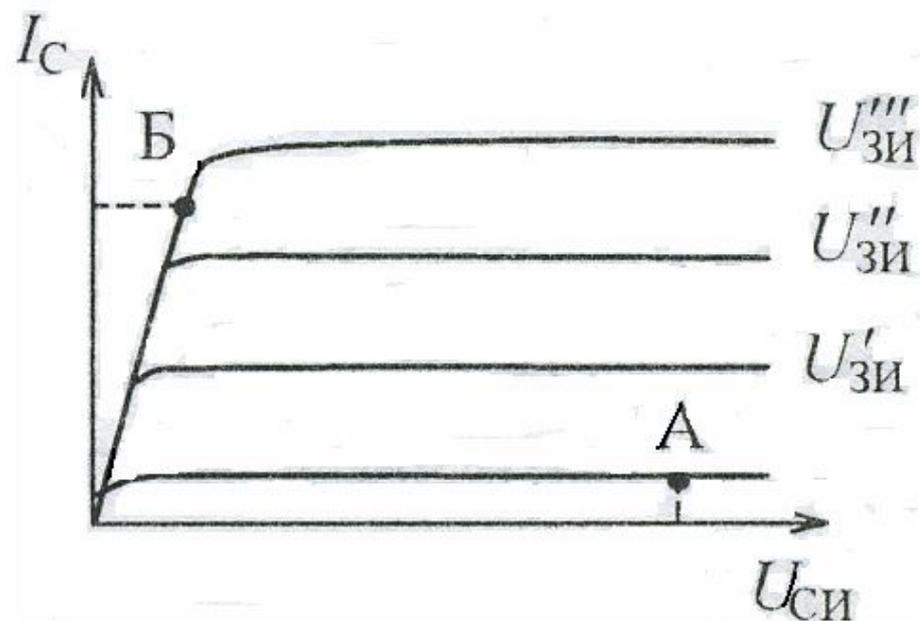
Достоинством полевых транзисторов является отсутствие затрат мощности на управление и высокое быстродействие в результате переноса тока носителями одного знака, что позволяет их использовать на большие Частоты. Недостатком является низкое напряжение и соответственно мощность приборов.

Внешние характеристики MOSFET

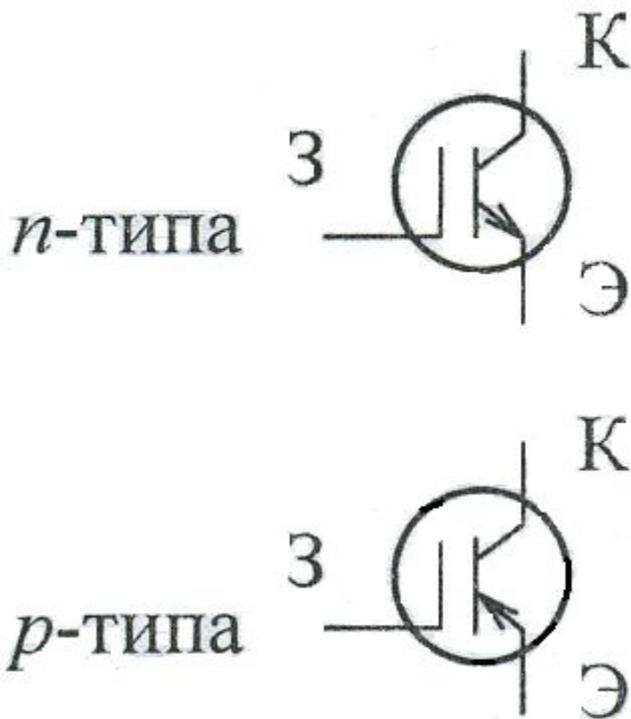
Со встроенным каналом



С индуцированным каналом



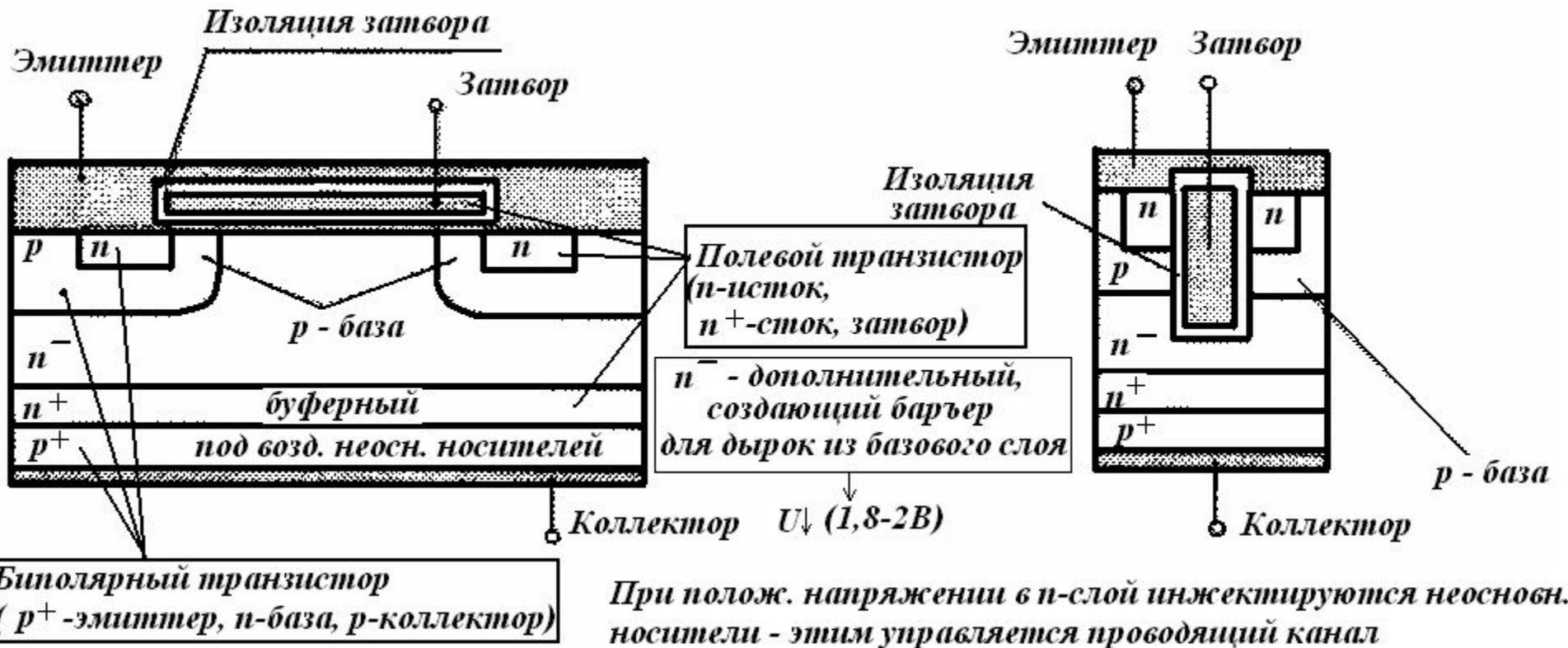
Комбинированный транзистор, конструктивно объединяющий полевой транзистор на входе и биполярный транзистор на выходе. Называется: биполярный транзистор с изолированным затвором **IGBT** (Isolated Gate Bipolar Transistor)



Преимуществом полностью управляемых транзисторов является легкость управления и низкие потери при работе транзистора.

Включение и выключение осуществляется подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком

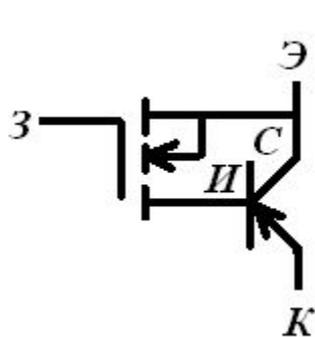
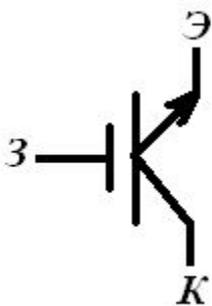
Схематический разрез структуры IGBT



При полож. напряжении в n -слой инжектируются неосновн. носители - этим управляется проводящий канал

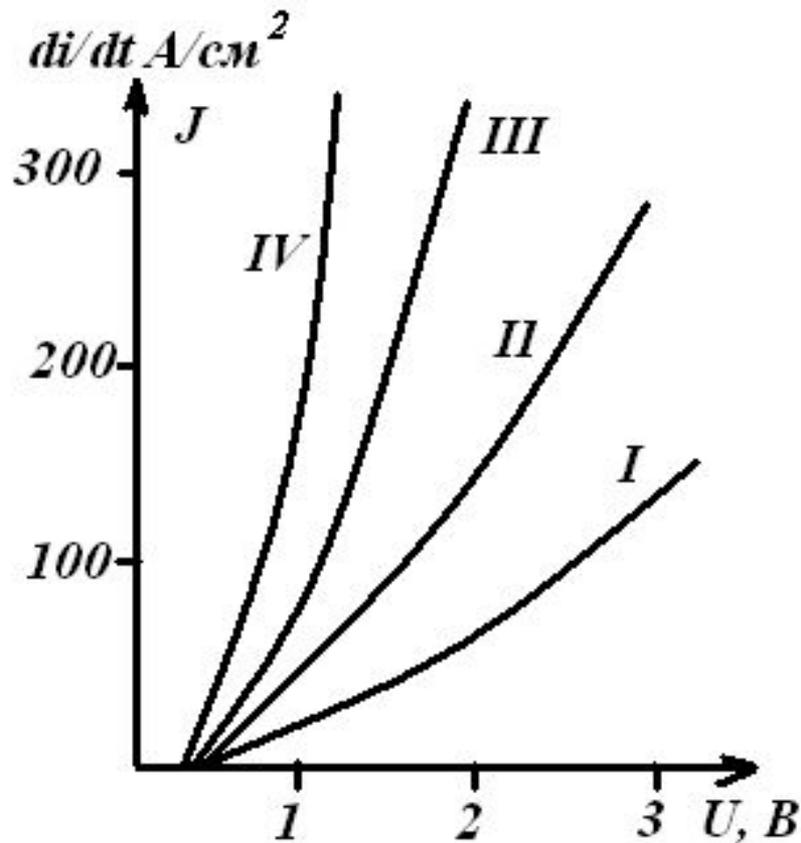
Процесс включения состоит из двух этапов:

1. при подаче полож. напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора (формируется канал n^-);
 2. движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора
- Выключение – обратное напряжение на затвор



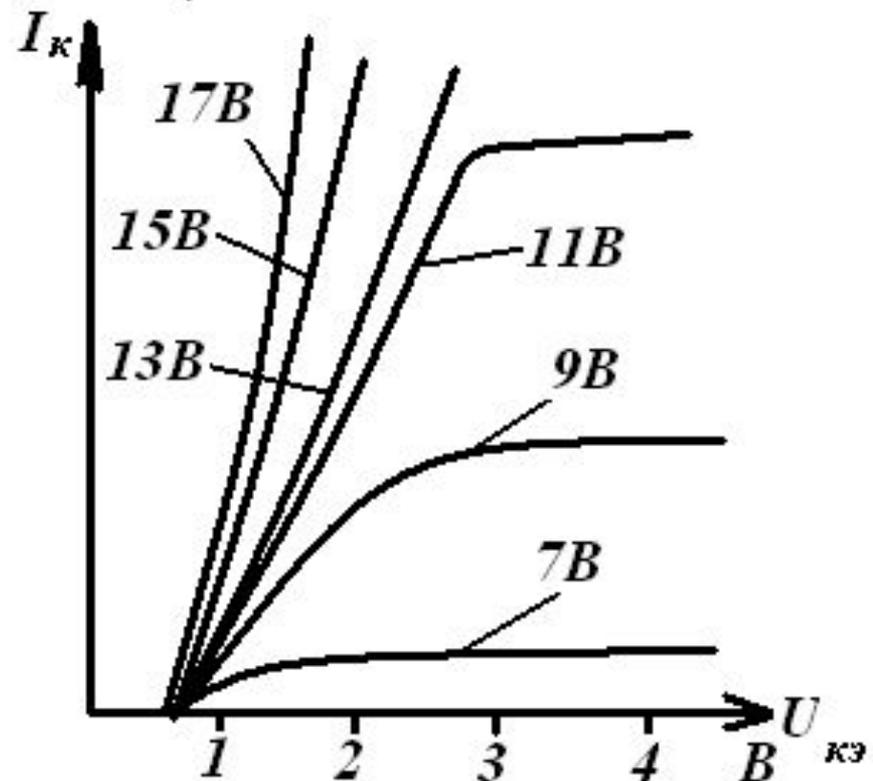
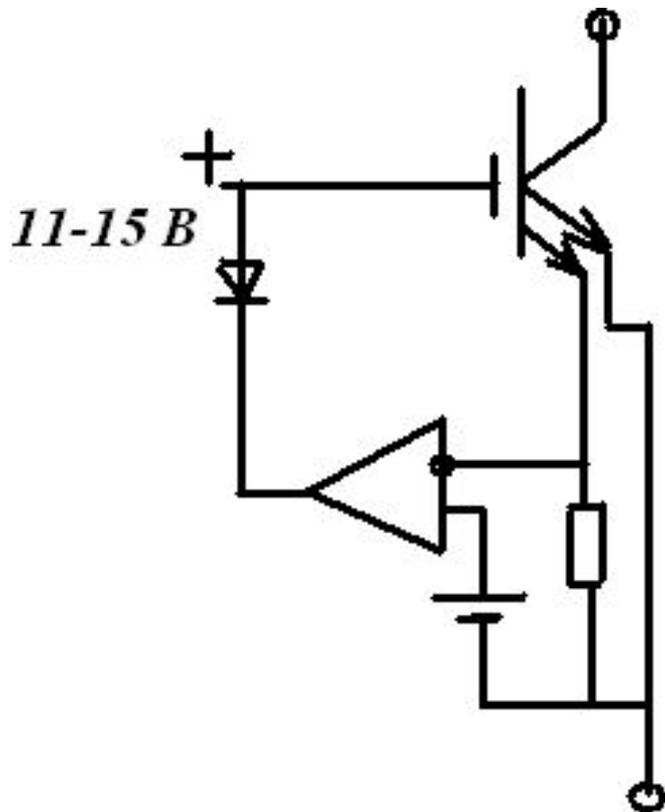
Транзисторы IGBT 4-го поколения коммутируют цепи с напряжением 4500 В и током до 1800 А, время выключения от 0,2 мкс до 1,5 мкс

Управление напряжением на затворе (11-15)В для уменьшения потерь при включении с ростом di/dt :

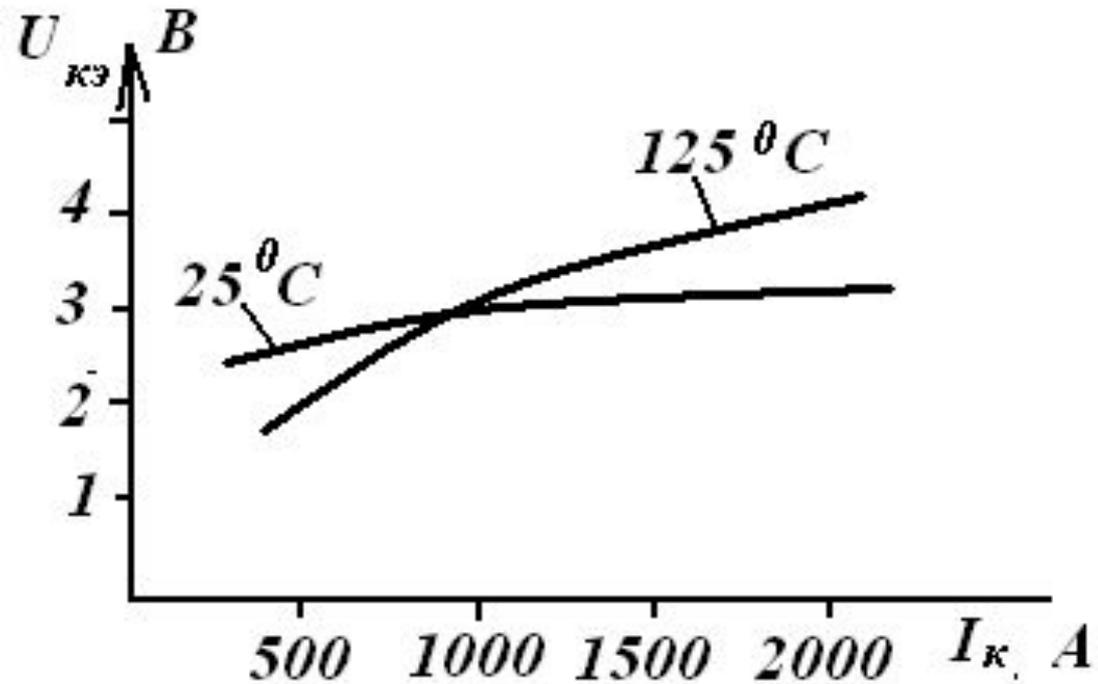


Принципиальная схема драйвера для управления IGBT

Высокие динамические характеристики прибора ведут к росту потерь проводимости

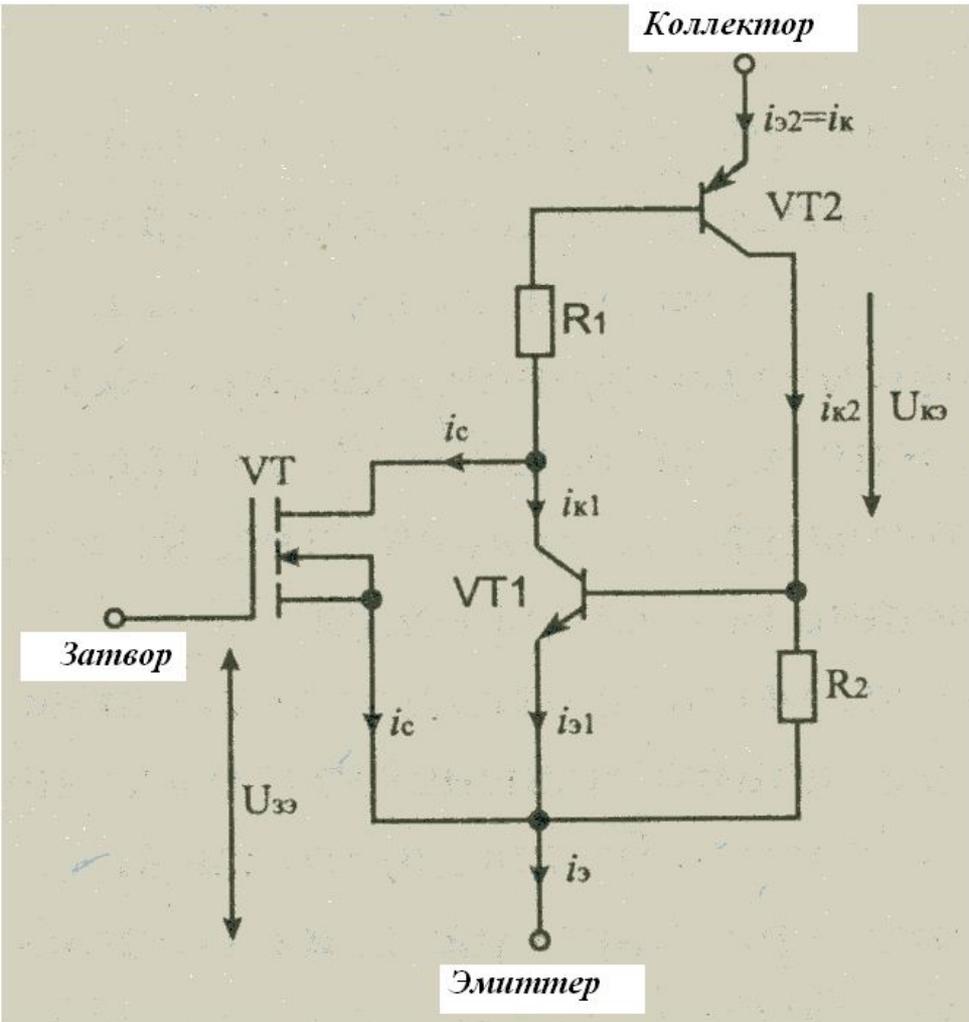


Температурная зависимость IGBT



С ростом температуры увеличивается время выключения и растут потери при коммутации

Технологическая схема IGBT



Принцип работы IGBT

Структура образует два биполярных транзистора имеющих внутреннюю положительную обратную связь, т.к. Ток коллектора одного транзистора влияет на ток базы другого транзистора и наоборот.

$$i_{k2} = i_{э2} \beta_2, \quad i_{k1} = i_{э1} \beta_1, \\ i_{э} = i_{k1} + i_{k2} + i_{с}$$

$$i_{с} = i_{э}(1 - \beta_1 - \beta_2)$$

Регулировкой R_1 и R_2 управляют β_2 и β_1

$$i_{к} = S U_{3э} / 1 - (\beta_1 + \beta_2)$$

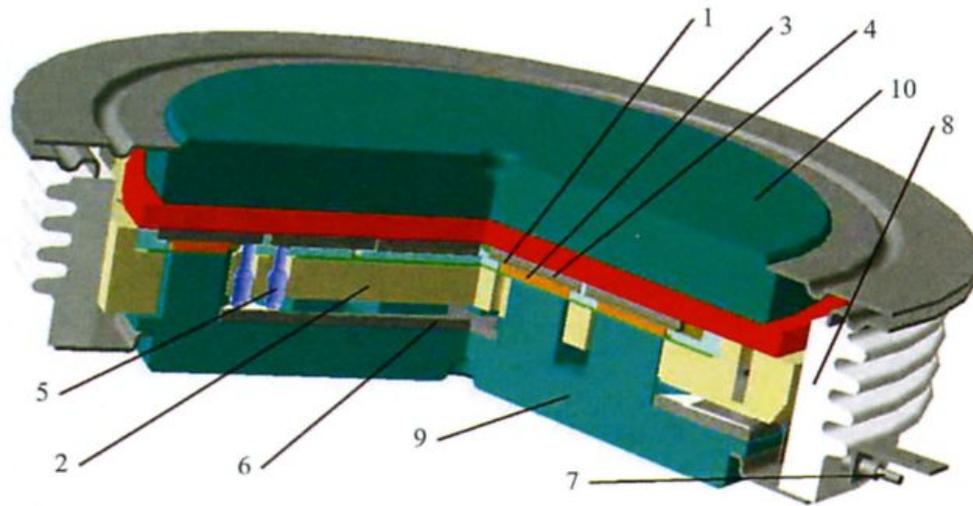
Модуль прижимной

$W - 75...150$ кГц, $U - 10...75$ кГц, $F - 3...10$ кГц, $S - 1...3$ кГц

МПТКИ-1200-33

3300

1200

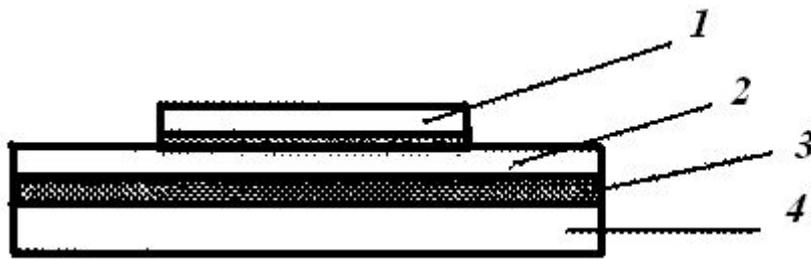


- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - кристалл | 6 - плата |
| 2 - кассета для кристаллов | 7 - управляющий вывод |
| 3 - эмиттерный термокомпенсатор | 8 - керамический изолятор |
| 4 - коллекторный термокомпенсатор | 9 - силовой эмиттерный контакт |
| 5 - пружинный контакт | 10 - силовой коллекторный контакт |

Недостаток: критичен к обратному напряжению

IGBT - модули

- IGBT в настоящее время выпускаются в модульном исполнении в прямоугольных корпусах или таблеточном исполнении

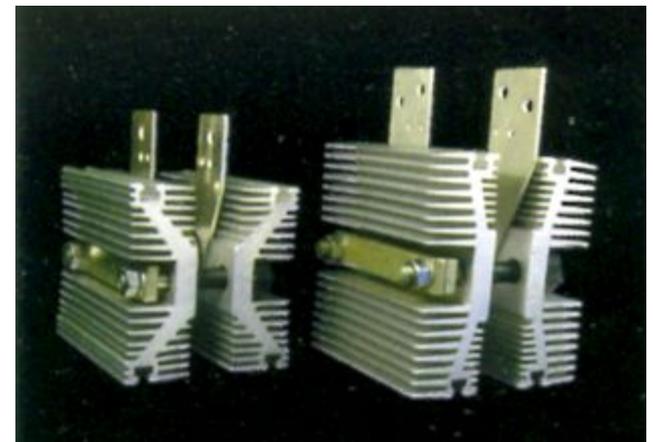


1- кристалл, 2 - слой керамики,
3 - спайка 4 - основание

- IGBT – модуль по внутренней схеме может быть единичный, два модуля, соединенных последовательно; прерыватель; однофазный или трехфазный мост и т.д., однако во всех случаях имеется обратный диод

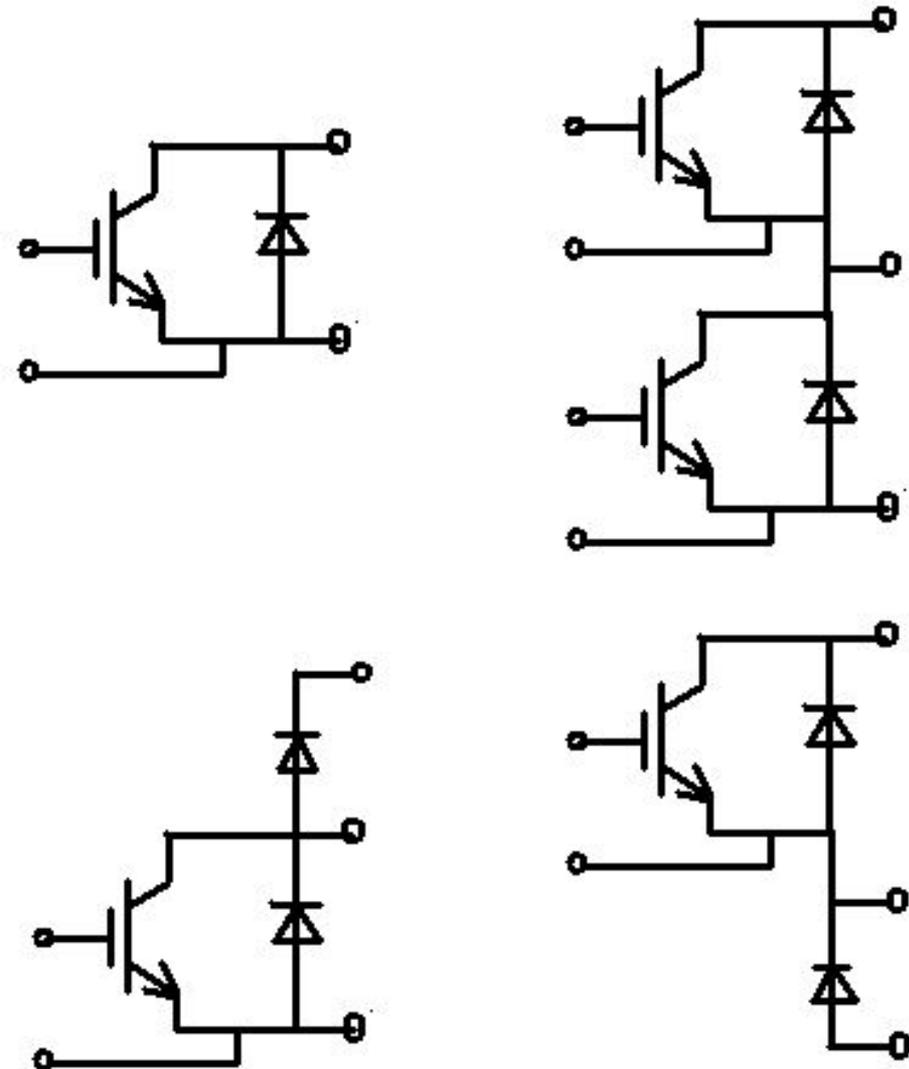
Мощность потерь:

$$P_D = (t_J - t_a) / R_{JC}$$

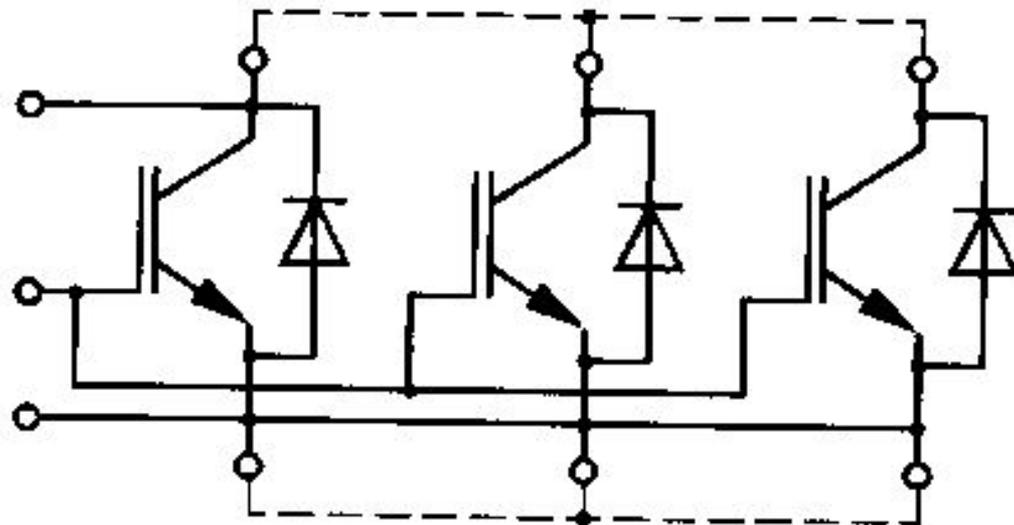
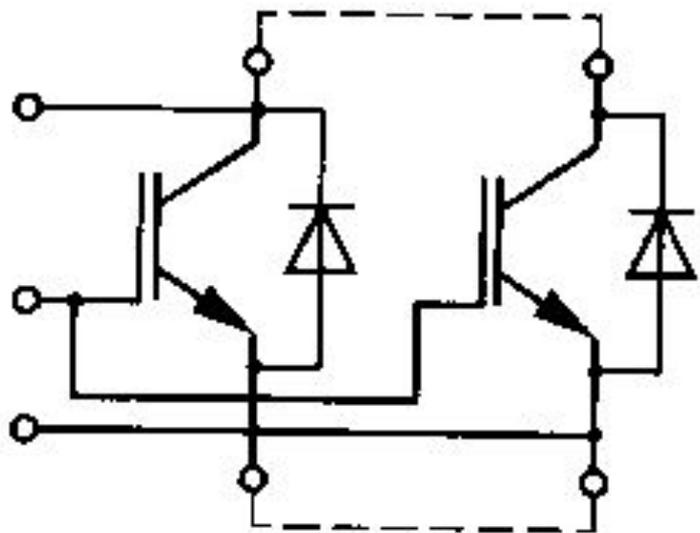


Модули IGBT

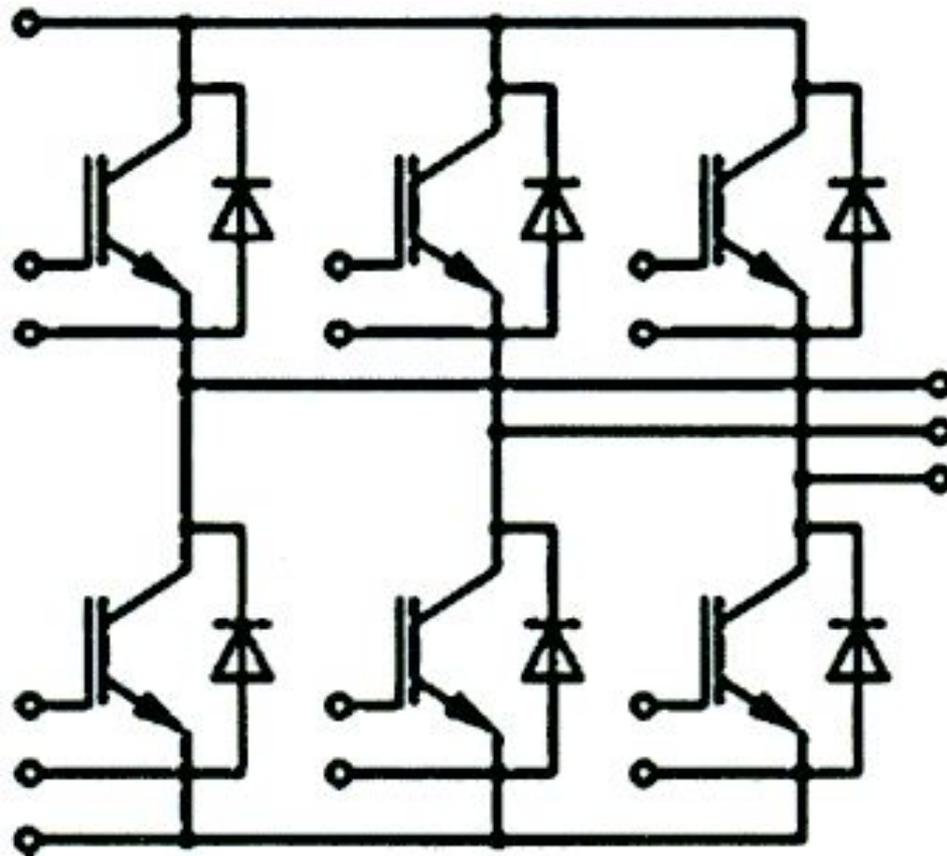
1. Коммутируемые токи до 2000 А;
2. Напряжение – 5-7кВ;
3. Плотности тока ниже тиристоров;
4. Легкость управления;
5. Критичны к перенапряжениям



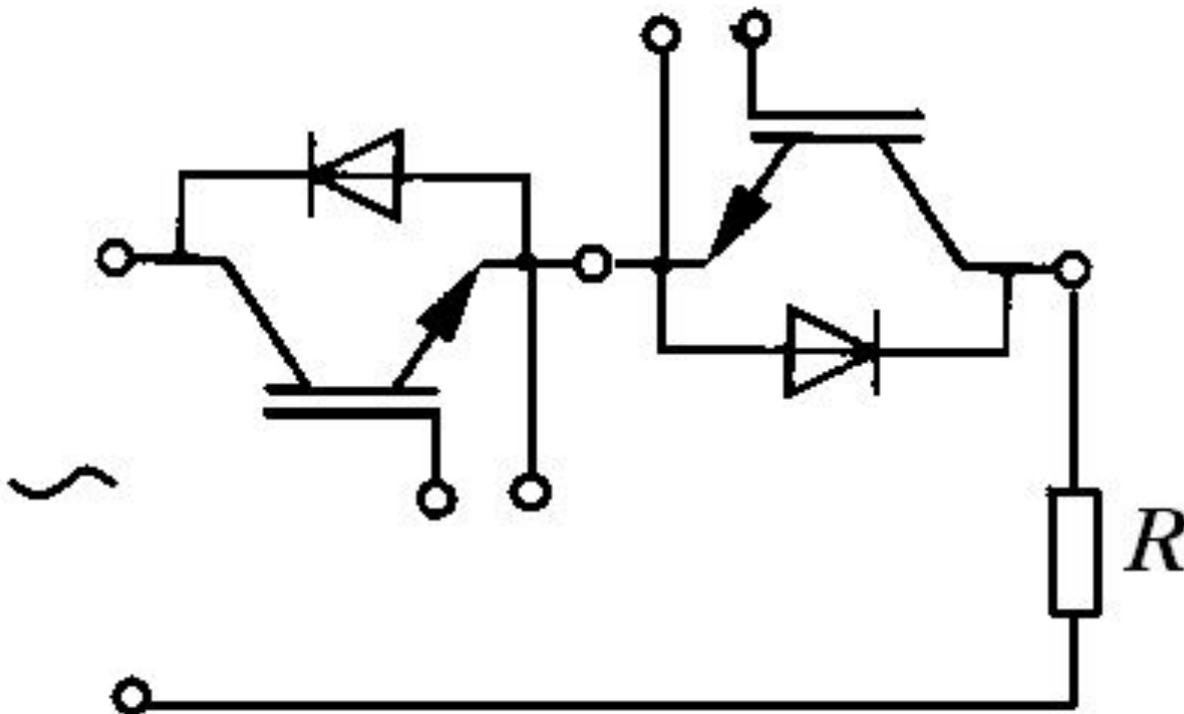
Параллельное соединение IGBT



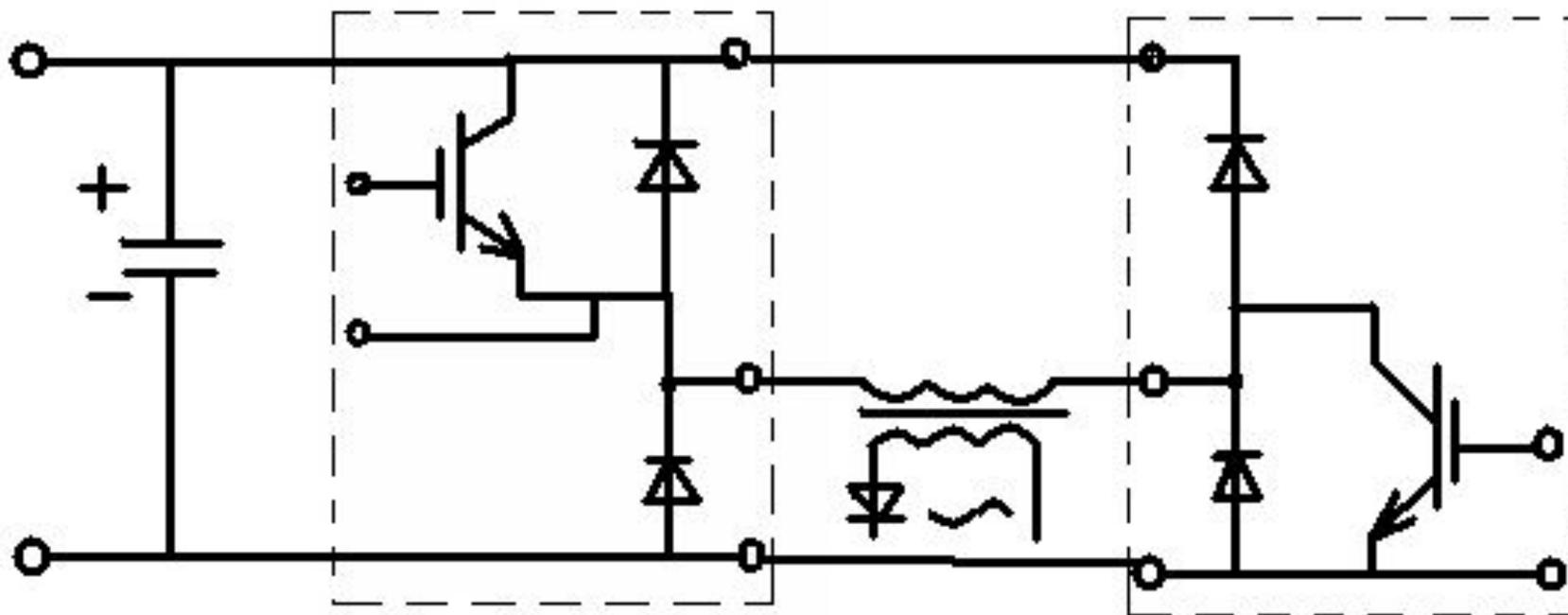
Трехфазный мост



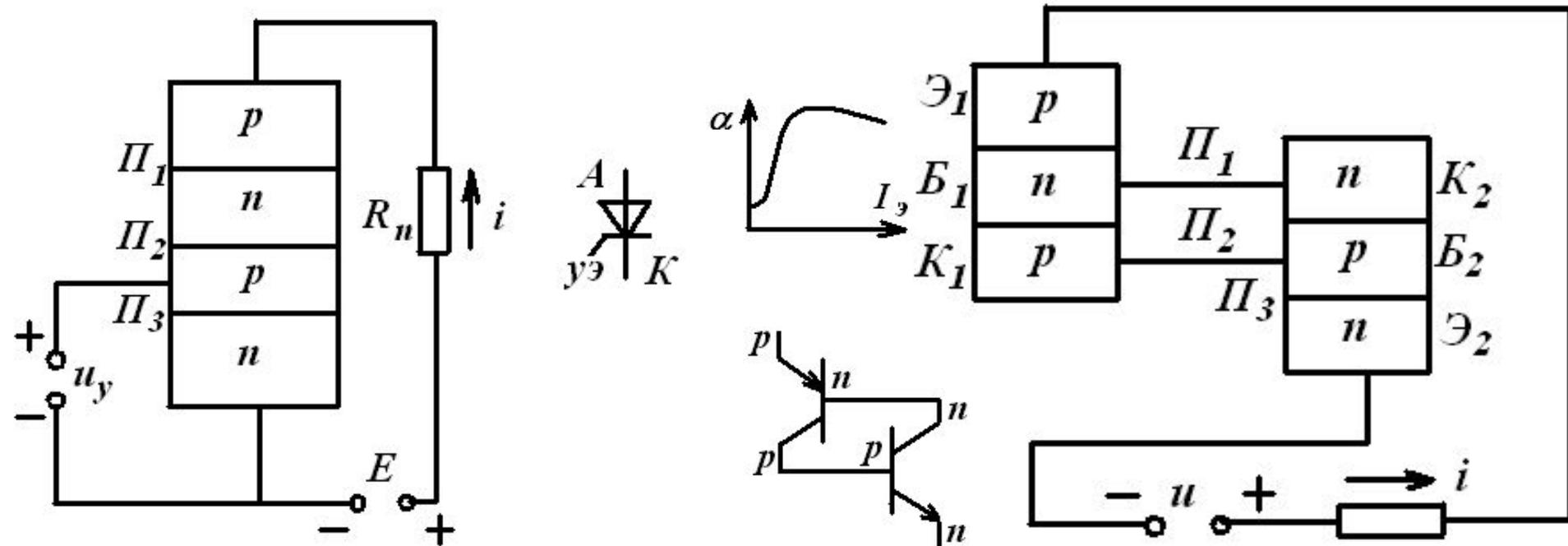
Выключатель переменного тока



Преобразователь постоянного напряжения в переменное заданной частоты (с выходом на постоянном токе)



Тиристор – четырехслойный полупроводниковый прибор, находящийся в двух устойчивых состояниях: закрытом и открытом

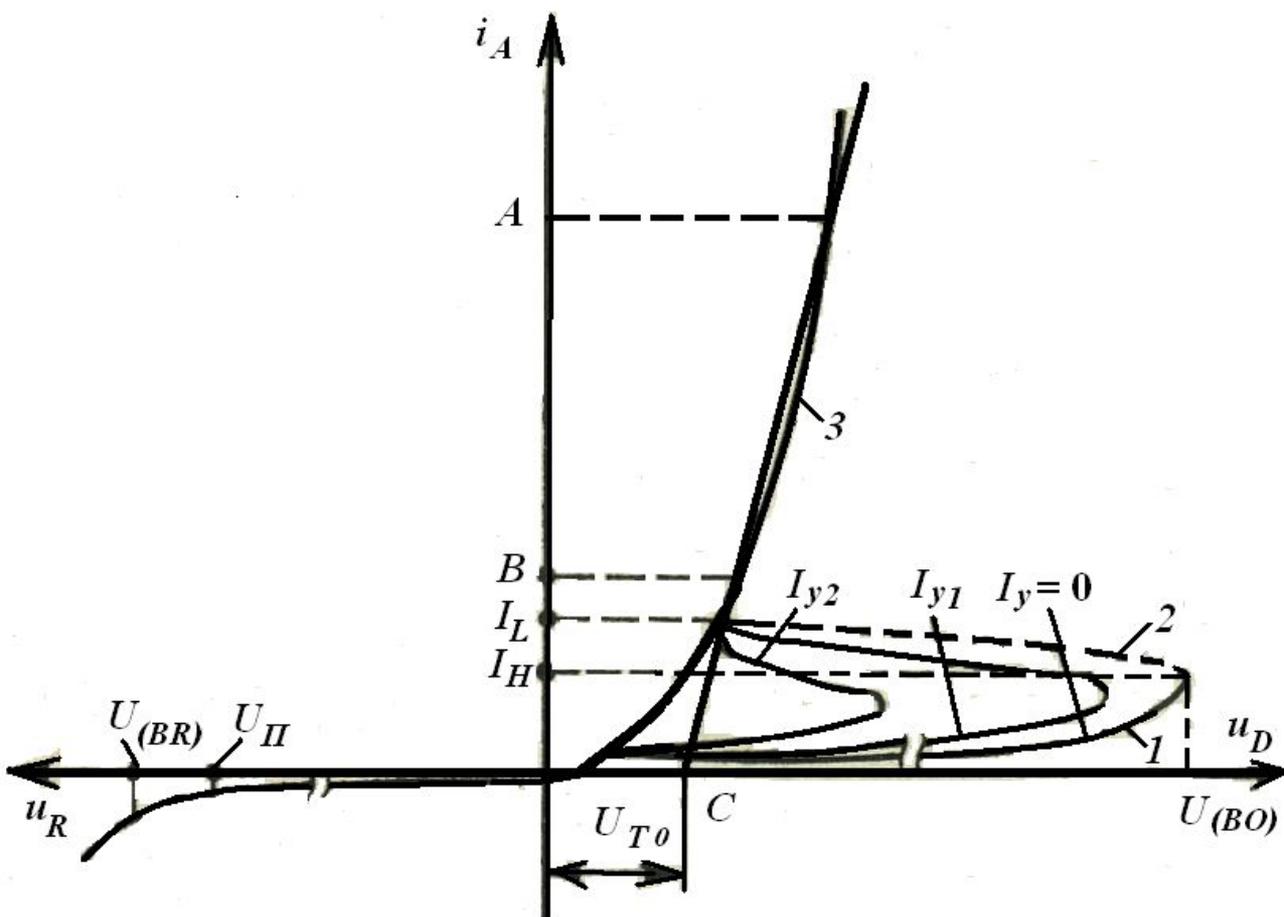


К переходам Π_1 и Π_3 подведено прямое напряжение, к переходу Π_2 – обратное.

Через переход Π_2 проходит ток коллекторов двух транзисторов (ток дырок и электронов). В результате суммарный ток: $i = I_0 + I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2}; (\alpha_1 I_{\text{Э}1} + \alpha_2 I_{\text{Э}2})$

Так как $I_{\text{Э}1} = I_{\text{Э}2} = i$, то: $i = I_0 / 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$

Работа тиристора определяется вольт - амперной характеристикой



i_A – анодный ток СПП (i_T),
 $U_{(BO)}$ – напряжение переключения,
 $i_G = i_y$ – тока управления,
 U_{T0} – пороговое напряжение,
 $U_{(BR)}$ – макс. обратное напряжение,
 u_D – напряжение на тиристоре в закрытом состоянии,
 $U_{II} (U_{RRM})$ – повторяющееся напряжение,
 u_R – обратное напряжение,
 i_L – ток включения,
 i_H – ток удержания

$$i = I_y \alpha_1 + I_0 / 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$$

ТБ253-1250-15-432 -
 (4-dU/dt), (3-t_{выкл}),
 (2, di/dt)

При обратном напряжении переход П₂ смещен в прямом направлении,
 а два крайних - в обратном

Тепловые параметры тиристоров

- Температура – основной критерий работоспособности СПП и стабильности характеристик в течении всего срока службы;
- Минимальная температура – 40...50 °С;
- Максимальная рабочая температура + 125...190 °С;
- Эквивалентная температура – усредненная по площади стр.;
- Установившееся тепловое состояние:

$$T_J - T_c = P_e R_B$$

T_c – температура корпуса, P_e - суммарные потери мощности,
 R_B – внутреннее установившееся тепловое сопротивление:

$$R_B = (T_J - T_c) / P_e$$

- С учетом охладителя (радиатора) общее тепл. сопротивление:

$$R_T = R_B + R_{c-0} + R_{0-a}$$

- R_{c-0} – тепловое сопротивление между охладителем и СПП,
- R_{0-a} – тепловое сопротивление между охладителем и окружающей ср.

- **Переходное тепловое сопротивление:**

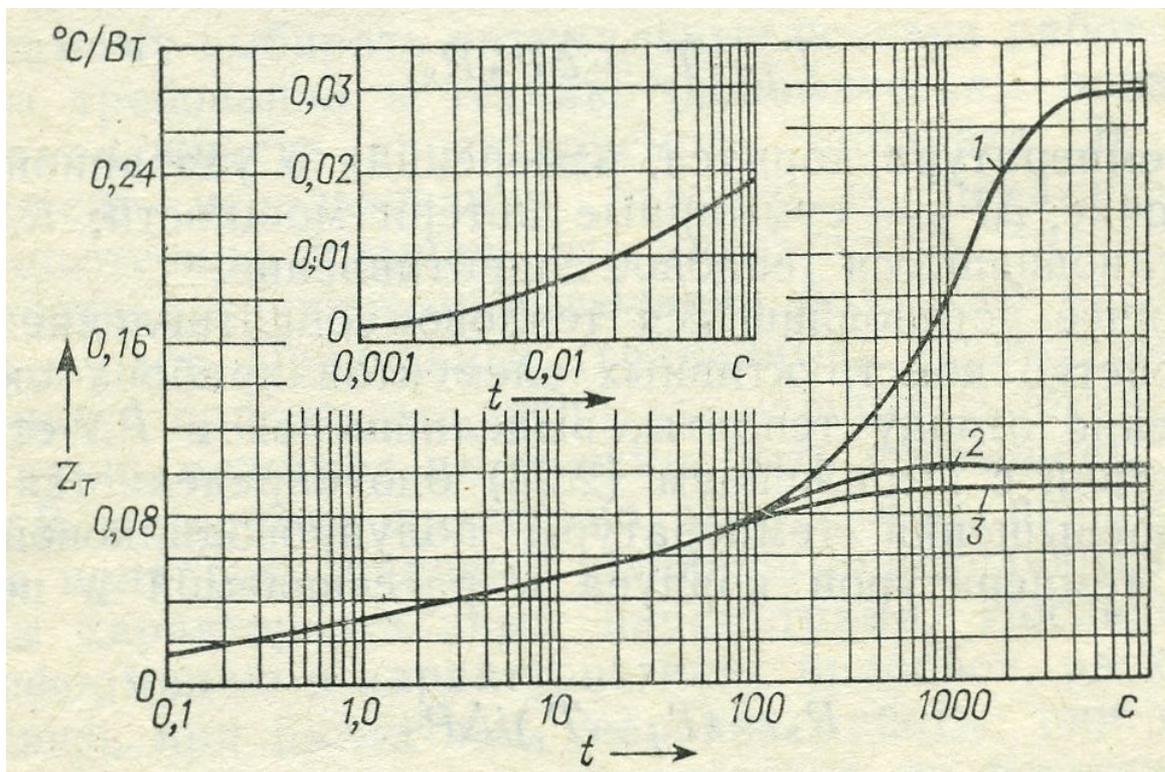
$$Z_T = [T_J(t) - T_a] / P_{max}$$

$T_J(t)$ – мгновенная температура структуры СПП;

- **Внутреннее переходное сопротивление:**

$$Z_B = [T_J(t) - T_C] / P_{max}$$

Зависимость переходного теплового сопротивления от длит. прот. тока



**1 – скорость обдува
воздухом – 0,
2 – 6 м/с,
3 – 12 м/с**

Параметры СПП (характеризуются статическими и динамическими параметрами)

- I_{Π} – предельный ток, это максимально допуст. ток за период, длительно протекающий через СПП, допускающий макс. нагрев структуры:

$$I_{\Pi} = \frac{\sqrt{U_{(TO)}^2 + 4k_{\Phi}^2 r_T \frac{[T_{jm}] - T_a}{R_T}} - U_{(TO)}}{2k_{\Phi}^2 r_T},$$

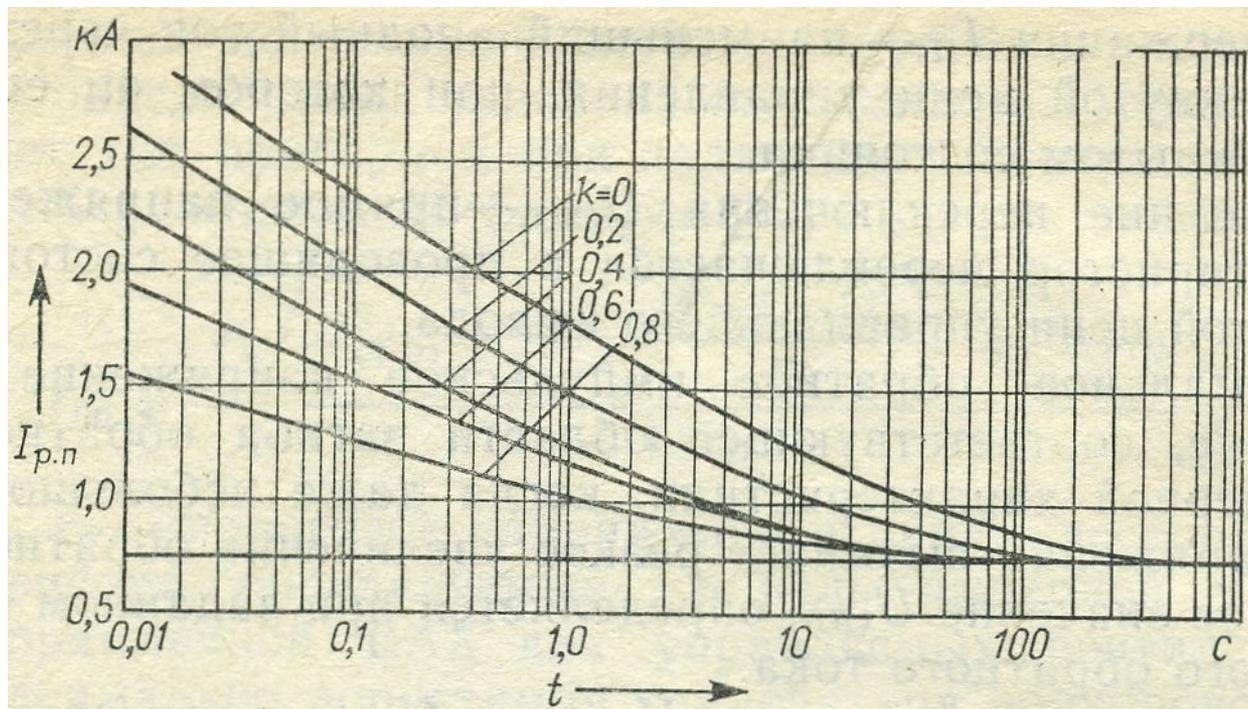
r_T – динамическое сопротивление СПП,
 k_{Φ} – коэффициент формы тока (I_d / I_0)

- I_D – ток утечки, протекающий через СПП при приложении прямого напряжения ($t - \max$);
- I_L – ток включения, это наименьший анодный ток, необходимый для поддержания СПП в открытом состоянии после снятия имп. управления;
- I_R – обратный ток;
- I_H – ток удержания тиристора в открытом состоянии при разомкнутой системе управления;
- $U_{(BO)}$ – напряжение переключения, это то напряжение, при котором тиристор переходит во включенное состояние при разомкнутой цепи управления ($t - \max$);
- $U_{(BR)}$ – максимальное обратное импульсное напряжение, соотв. загибу обратной характеристики СПП (соответствует допустимому обратному значению тока) ($t - \max$);
- U_{Π} – повторяющееся импульсное напряжение, это наибольшее мгновенное напряжение, которое прикладывается к прибору в закрытом состоянии в любом направлении. Этот параметр определяет класс прибора ($U_{\Pi} / 100$)

- U_{DSM} – неповторяющееся напряжение это наибольшее мгновенное переходное напряжение, прикладываемое к прибору в закрытом состоянии;
- U_{DWM} – рекомендуемое рабочее напряжение, это амплитудное значение синусоидальной формы напряжения, прикладываемого к тиристорам в прямом и обратном направлении при отсутствии повторяющихся напряжений;
- U_{TM} – прямое падение напряжения, это мгновенное значение напряжения на тиристоре при прохождении прямого тока;
- $\pi I_{\Pi} = I_A$ – амплитудное значение прямого тока

Эксплуатационные параметры для тока:

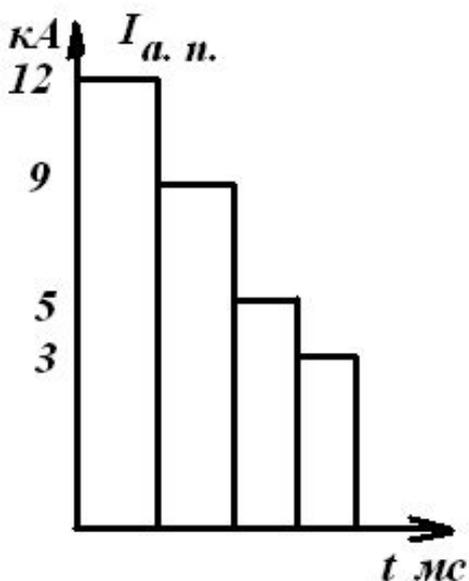
- $I_{р.п.}$ - ток рабочей перегрузки, это ток перегрузки, протекающий через прибор, непосредственно действующий после тока, меньшего предельного, длительное протекание которого может вызвать превышение допустимой температуры структуры СПП, но ограничен во времени и перегрев структуры не происходит. После протекания этого тока допускается приложение обратного напряжения.



T123-320

V - 12м/с

- $I_{a.п}$ – ток аварийной перегрузки, это ток протекание которого вызывает превышение максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры, поэтому допускается лишь ограниченное число коммутаций такого тока за весь срок службы СПП. Прибор может кратковременно утратить запирающую способность, поэтому допускается приложении обратного напряжения 80% от $U_{п}$

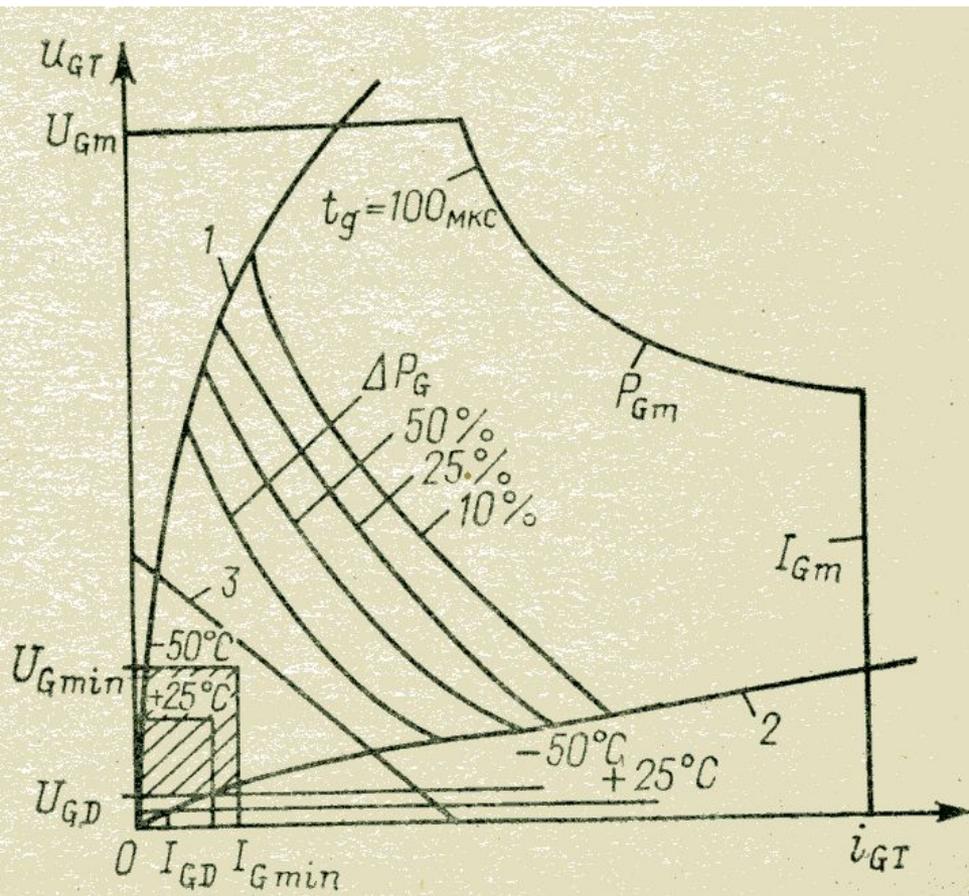


T123 - 320

- I_{TSM} – ударный неповторяющийся ток, это максимально допустимая амплитуда тока синусоидальной формы, длительностью 10 мс без последующего приложения обратного напряжения. По этим параметрам устанавливается защита СПП.

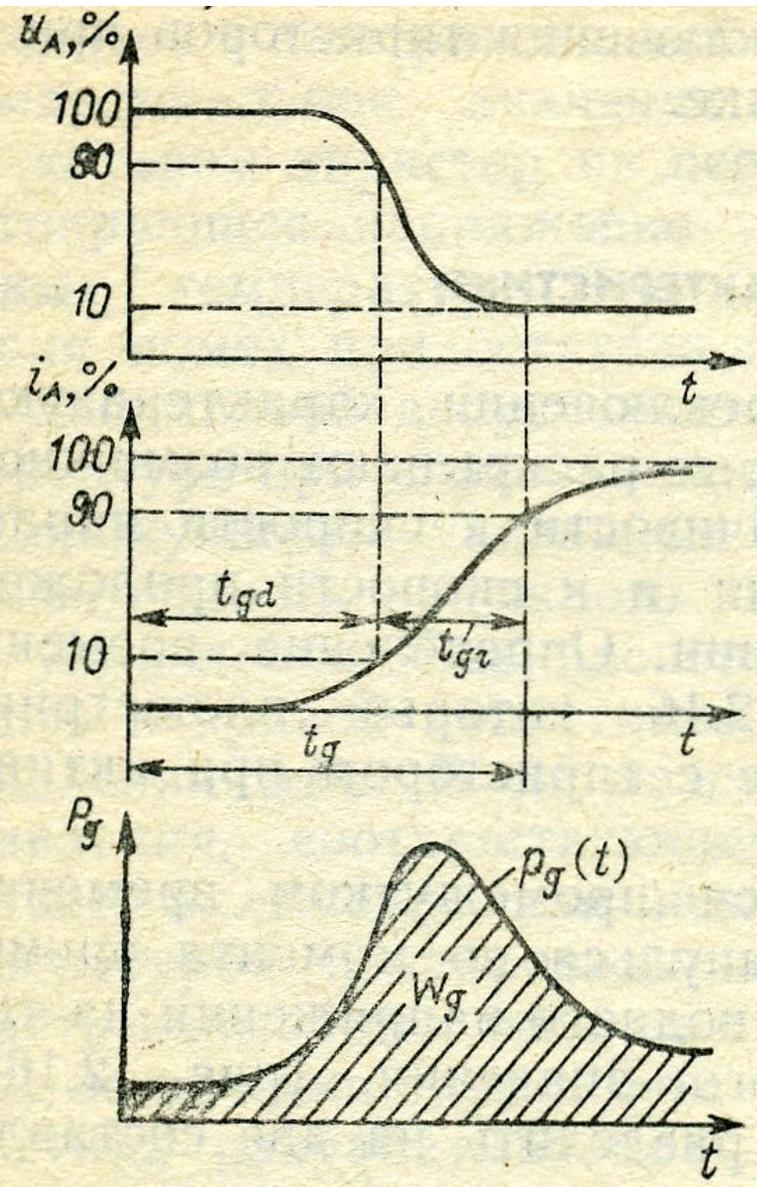
Характеристики управления - определяются свойствами прилегающих к переходу Π_3 слоев

Из-за разброса вольт - амперных характеристик устанавливают диаграмму управления:



1-2 – предельные вольт – амперные Характеристики,
 U_{Gm}, I_{Gm} – максимальное напряжение и тока цепи управления,
 U_{Gmin}, I_{Gmin} – наименьшее напряжение и ток управления ($U_a = 12\text{В}, t^0 - \text{var.}$),
 U_{GD}, I_{GD} – максимальное напряжение и ток, при которых тиристор не включается,
 P_{Gm} – максимально допустимая мощность цепи управления,
3 – нагрузочная характеристика (должна проходить выше заштрихованной области)

Динамические характеристики тиристоров

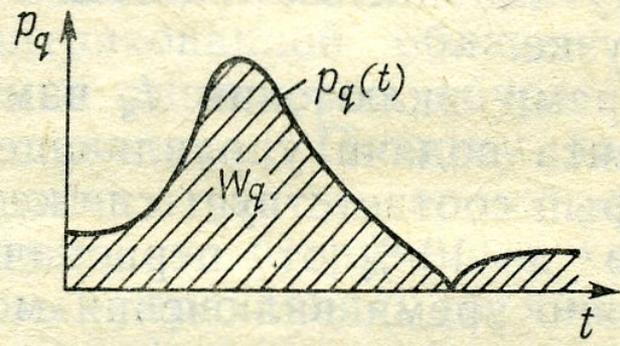
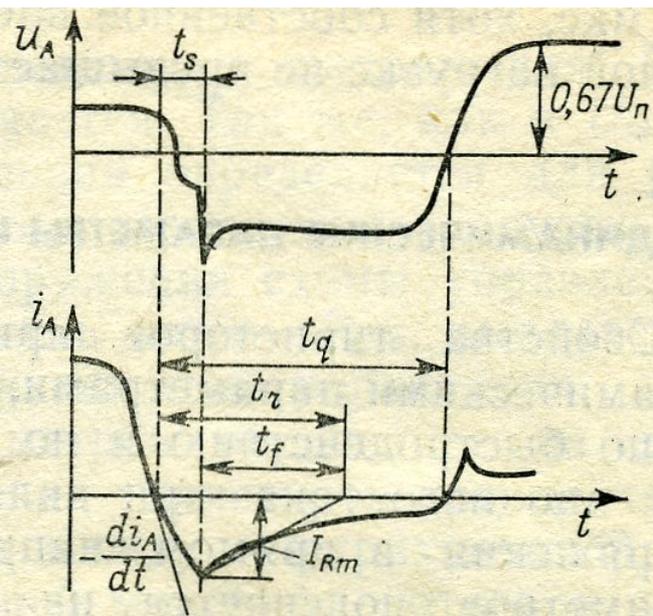


- t_g – время включения (от момента подачи импульса управления до снижения анодного напряжения – $10\%U_a$):

$$t_g = t_{gd} + t_{gr}$$

- t_{gd} – время задержки включения тиристора,
- t_{gr} – время снижения напряжения до $10\%U_a$

- t_q – время выключения (от момента перехода тока через нуль до восстановления запирающих свойств тиристора)



t_s – время от перехода тока через нуль до I_{Rm} (время запаздывания обратного напряжения)

Q_r – накопленный заряд неосновных носителей,
 t_r – время восстановления запирающих свойств тиристора,

t_f – время спада обратного тока,

dU/dt – допустимая скорость нарастания напряжения не приводящая к переключению СПП,

di/dt – допустимое значение скорости нарастания тока (скорость распространения Включенного состояния 0.1 мм/мкс)

Электрические потери при работе тиристора

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T i u_A dt$$

Суммарные потери за период работы тиристора

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_o + \Delta P_{\text{д}}$$

(90%+10%)

$$\Delta P_{\text{д}} = \Delta P_D + \Delta P_R + \Delta P_g + \Delta P_q + \Delta P_G$$

Дополнительные потери:

ΔP_D - потери от тока утечки в прямом направлении

ΔP_R - потери от обратного тока утечки

ΔP_g - коммутационные потери при включении

ΔP_q - коммутационные потери при выключении

ΔP_G - потери в цепи управления тиристора

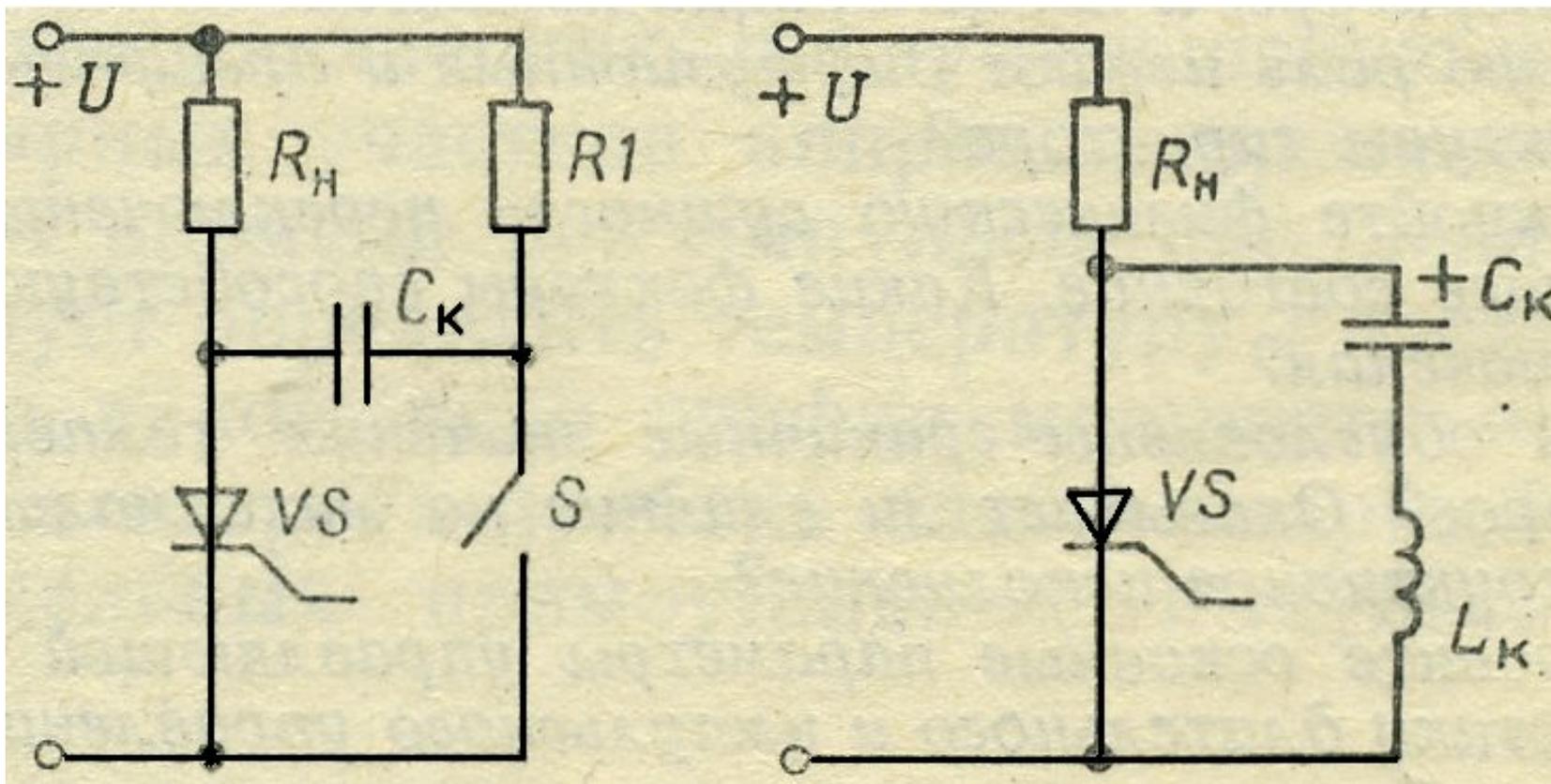
Примеры типов тиристоров

- ТБИС-800-14 ($t_q = 6.3-12.5$ мкс; $di/dt = 1600$ А/мкс; $dU/dt = 1000$ В/мкс) – 190 Е
- Т173-3200-10 ($di/dt=400$ А/мкс; $dU/dt=1000$ В/мкс)
- Т753-500-60 ($t_q = 500-600$ мкс; $di/dt = 630$ А/мкс; $dU/dt = 1000$ В/мкс)
- ТБИ 273-2000-22 ($t_q = 22-50$ мкс; $di/dt=1600$ А/мкс; $dU/dt = 1000$ В/мкс) – 390 Е
- ТБИ 153-400-11 ($di/dt=1600$ А/мкс; $dU/dt = 1000$ В/мкс) – 62 Е

диаметр – «3» - 32 мм, «4» - 40 мм, «5» - 56 мм, «7» - 80 мм

Аппараты НН

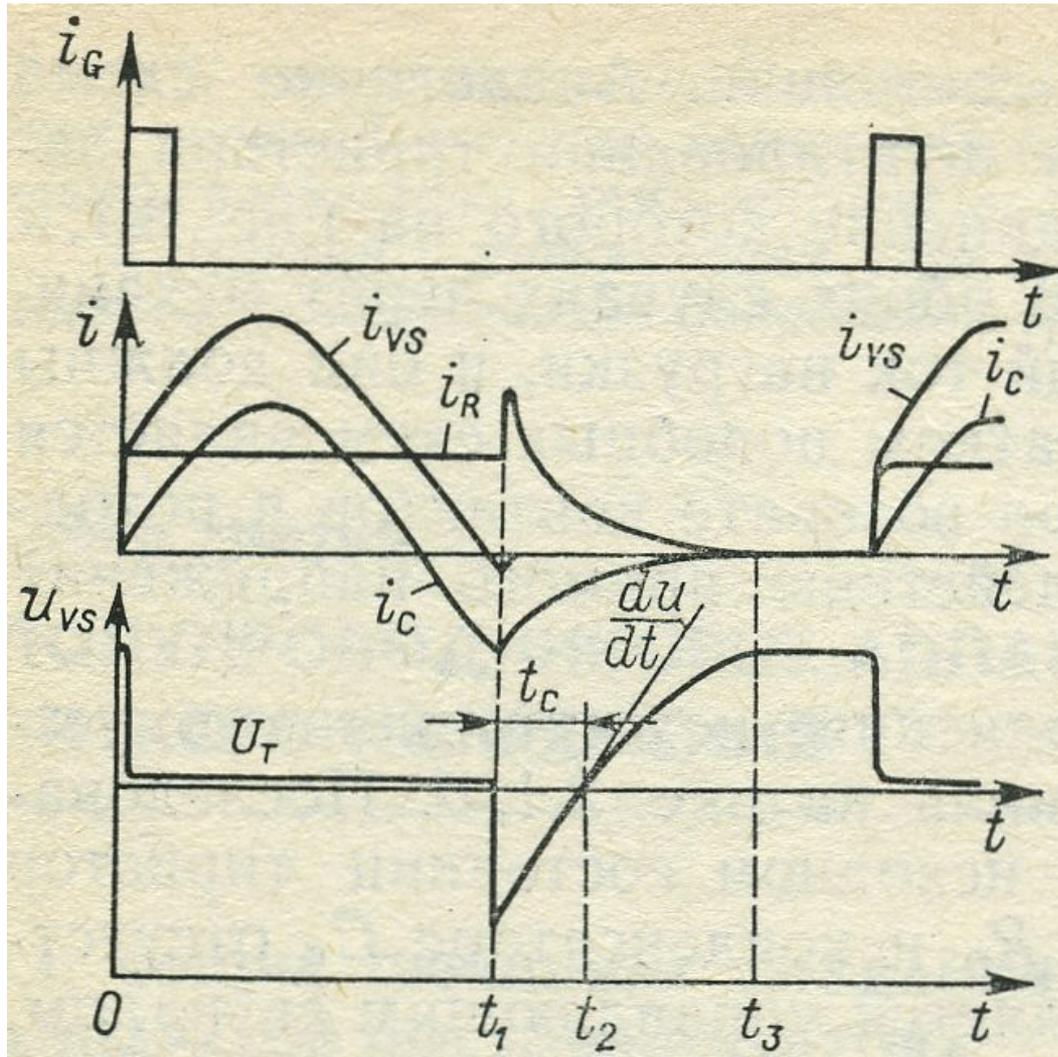
ПЭА постоянного тока



Выключение с помощью C_k

С колебательной перезарядкой C_k

Диаграмма схемы с искусственной коммутацией



Выключатель постоянного тока

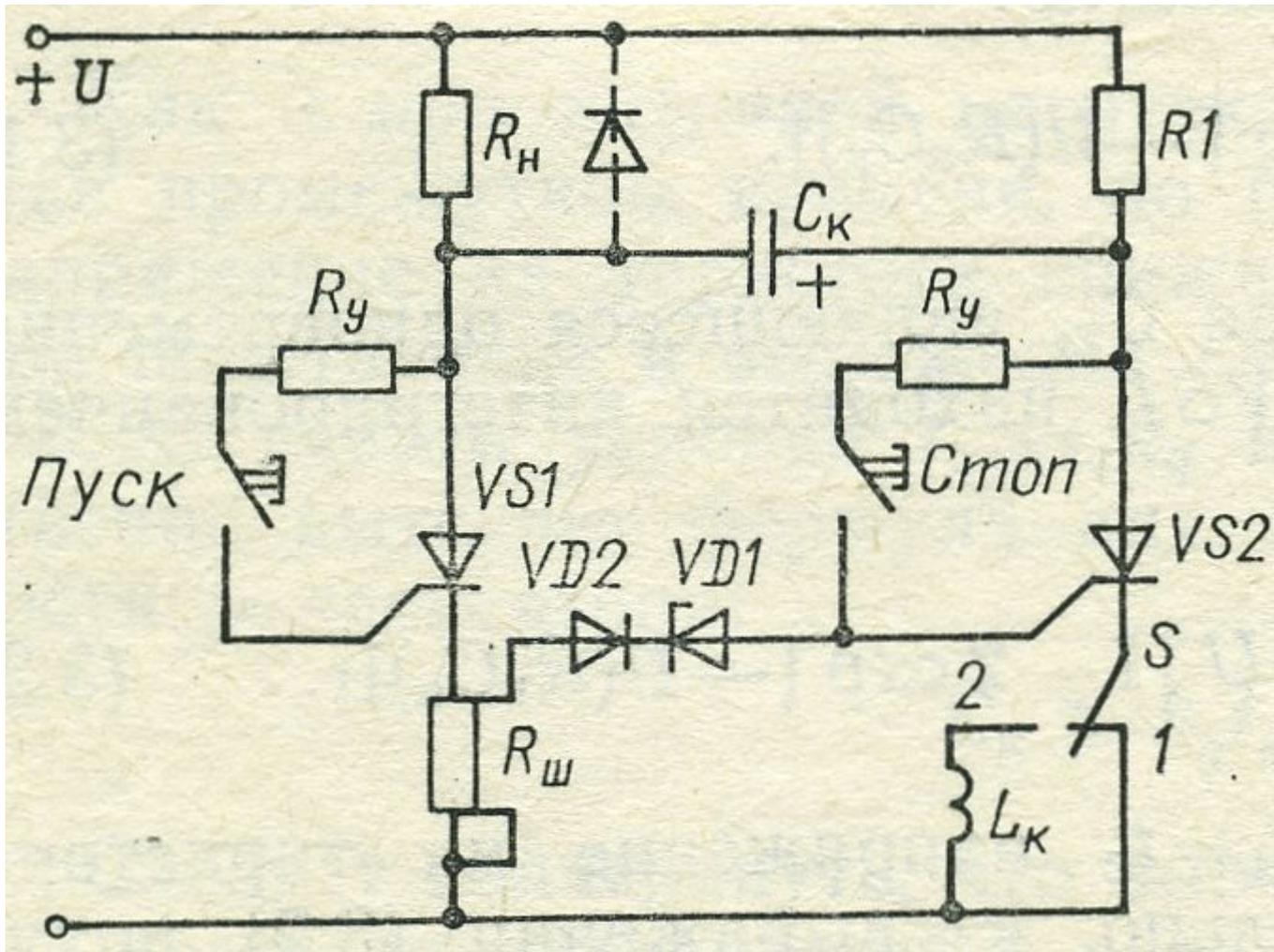
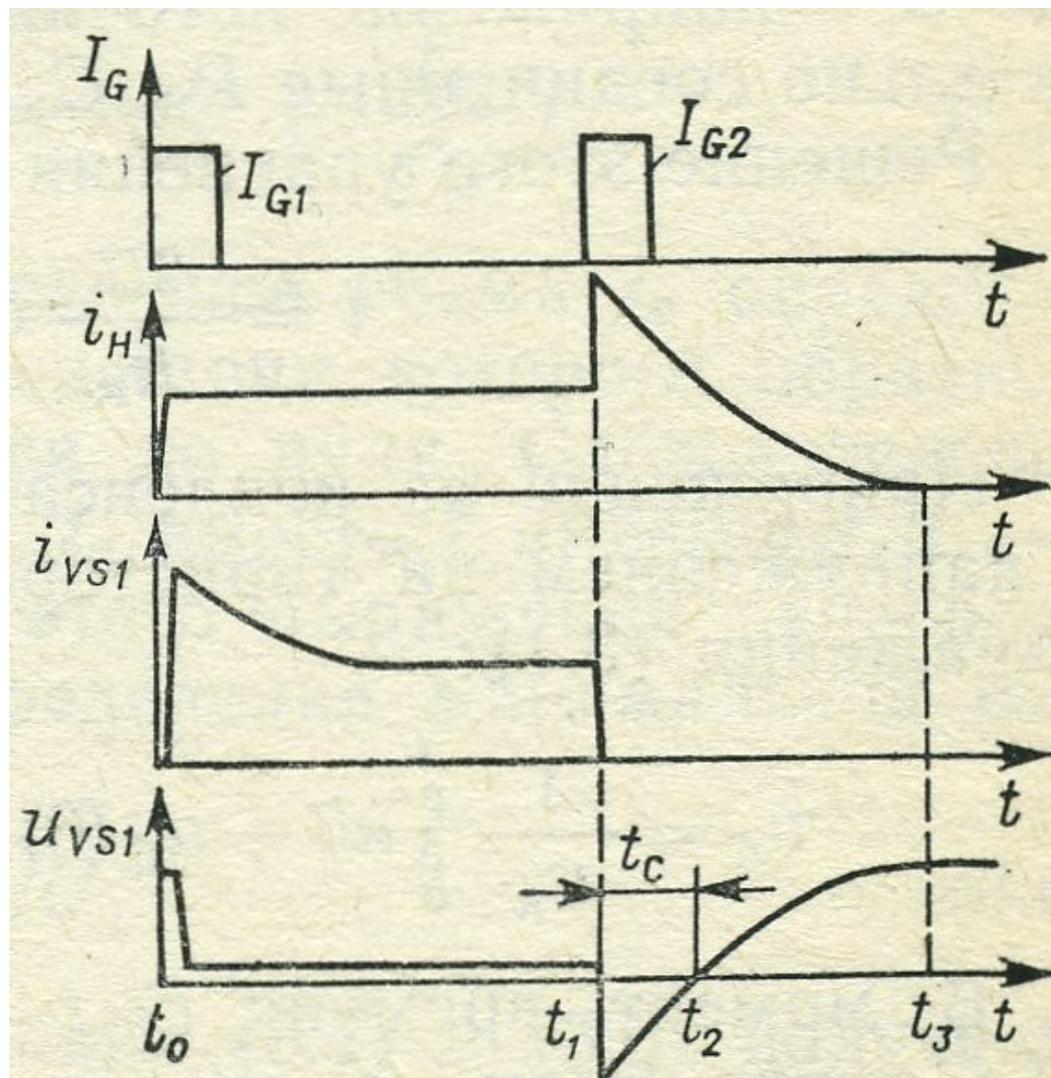


Диаграмма работы ВПТ



Определение минимальной емкости конденсатора

Напряжение разрядки конденсатора:

$$U = \frac{1}{C_K} \int_0^t i dt + i R_H,$$

откуда:

$$i = \frac{2U}{R_H} \exp[-t/(R_H C_K)]$$

Напряжение на C_K и тиристоре VS1:

$$u_C = \frac{1}{C_K} \int_0^t i dt + u_C(0) = U \{1 - 2 \exp[-t/(R_H C_K)]\}$$

$t = t_2 - t_1 = t_c$ - время при котором напряжение на VS1 равно нулю, тогда:

$$\exp[-t_c/(R_H C_K)] = 0,5$$

После логарифмирования:

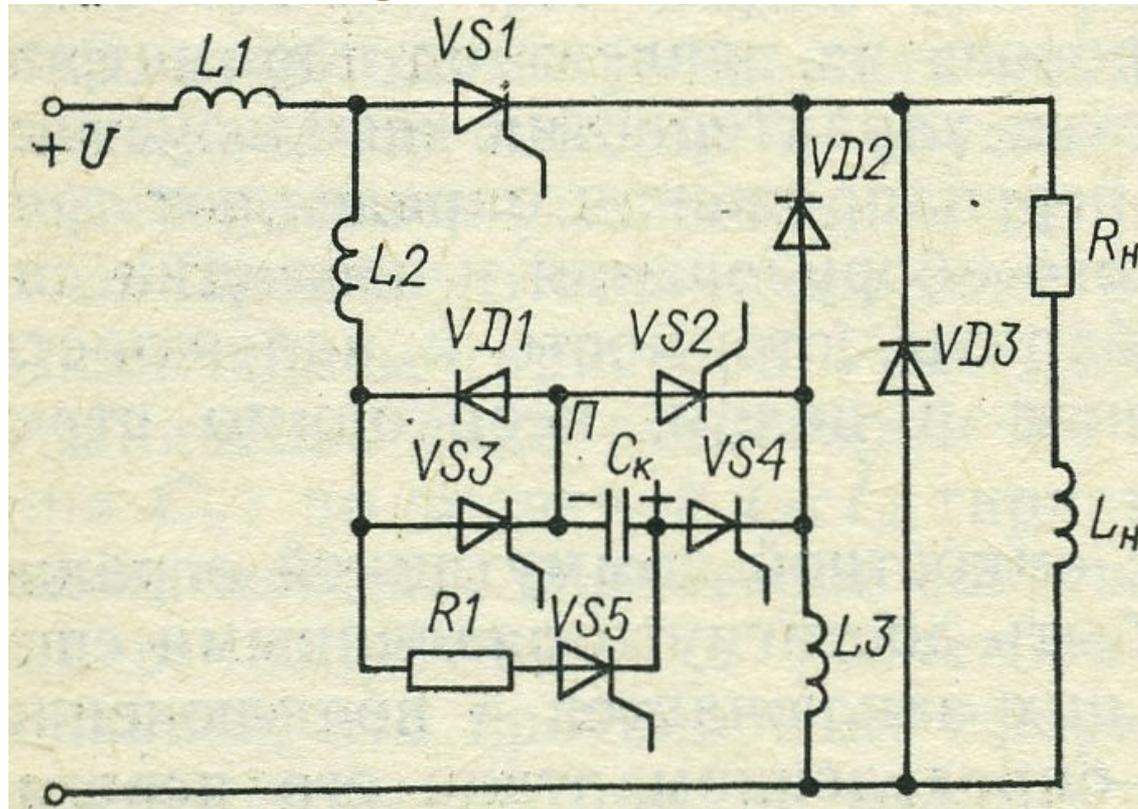
$$t_c = \ln 2 \cdot R_H C_K \approx 0,69 R_H C_K \quad \text{поскольку} \quad U = R_H I_K \quad t_c = 0,69 U C_K / I_K$$

Тиристор выключится при $t_c \geq t_q k_q$

Минимальная емкость конденсатора

$$C_K \geq 1,45 k_q t_q I_K / U$$

Выключатель с двухступенчатой коммутацией



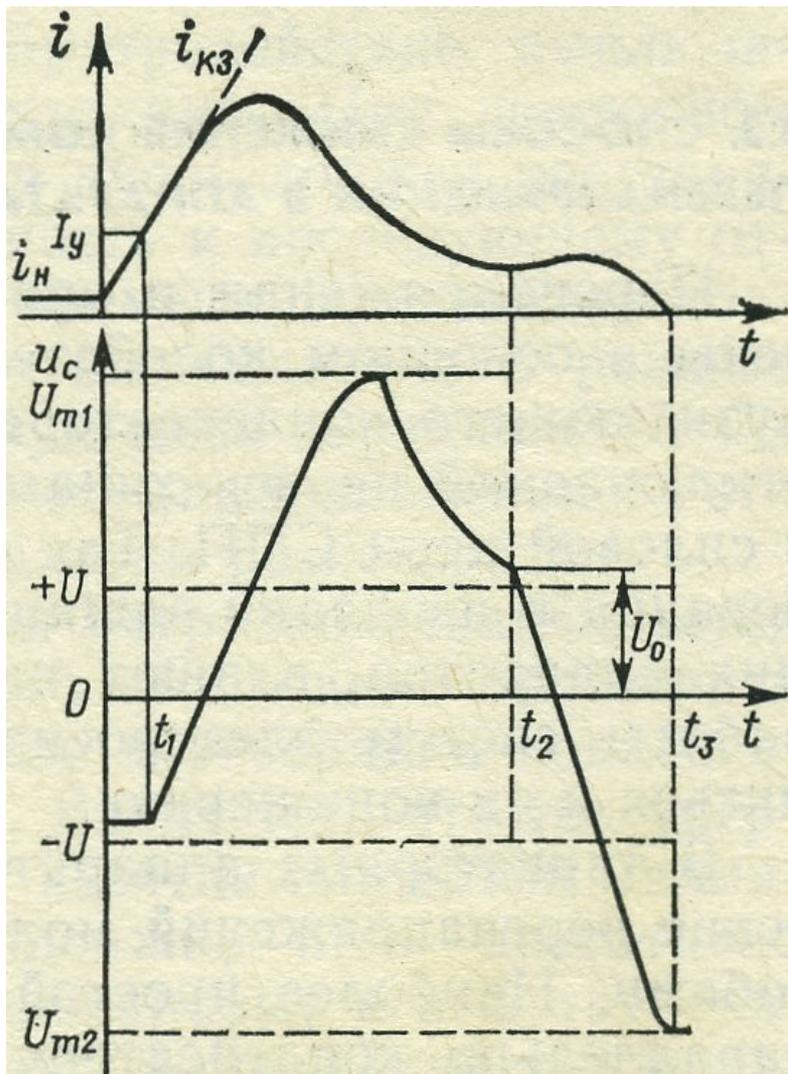
1. Вкл. VS2 и VS5

Ток зарядки C_k :
L1, L2, VS5, C_k , VS2,
L3

2. При КЗ включаются VS3 и VS4 и тиристор VS1 выключается

3. C_k перезаряжается до U_{m1} , вкл. VS5 и U уменьшается. При U_0 вкл. VS2 и ток протекает по цепи: +U, R1, VS5, C_k , П, VS2, VD2, ... -U; напряж имз. полярн. $I=0$

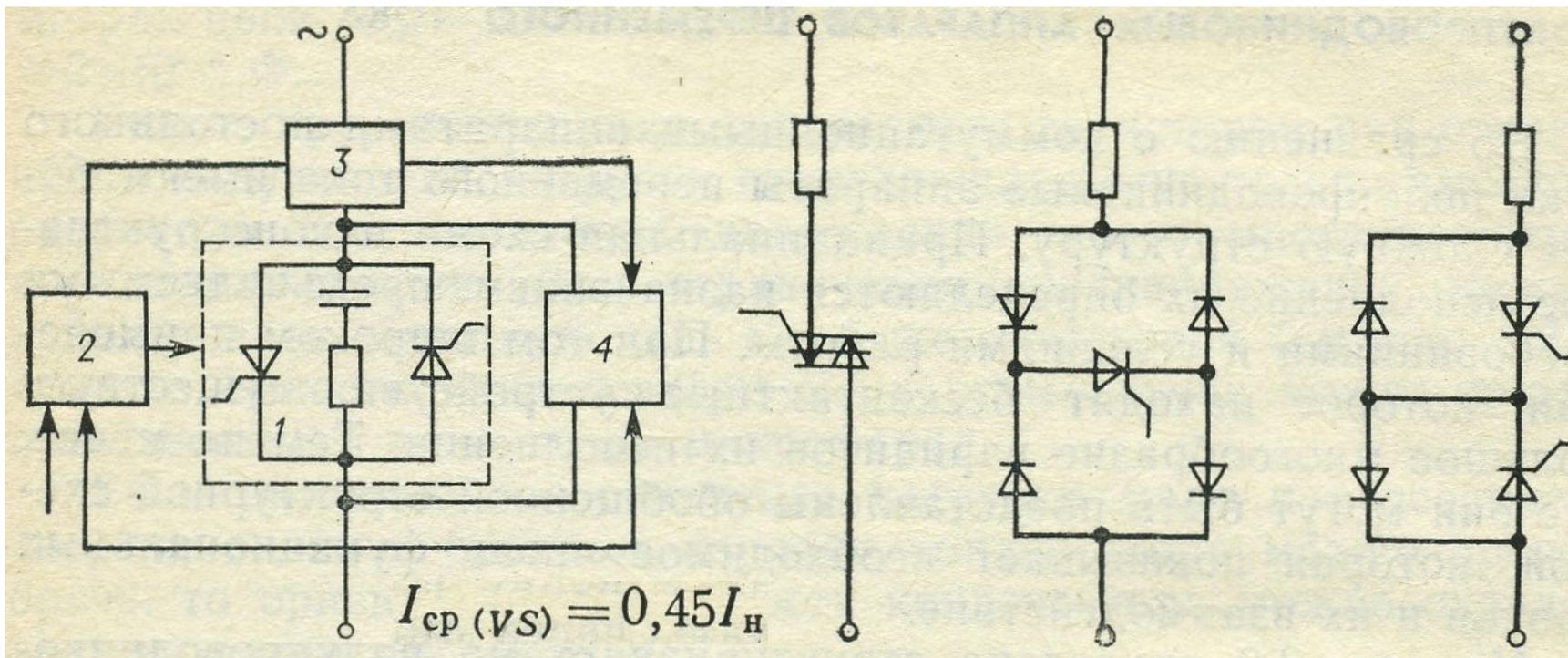
Диаграмма двухступенчатой коммутации



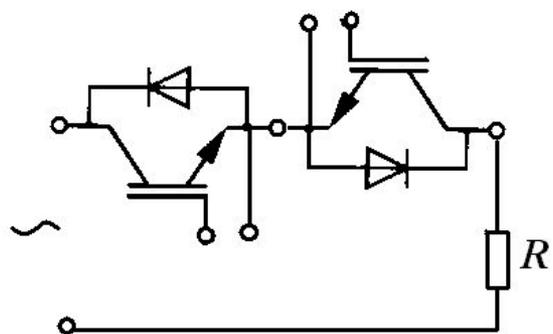
При U_{m1} включается VS5

При U_0 ток протекает по цепи:
R1, VS5, C_k , П, VS2, VD2

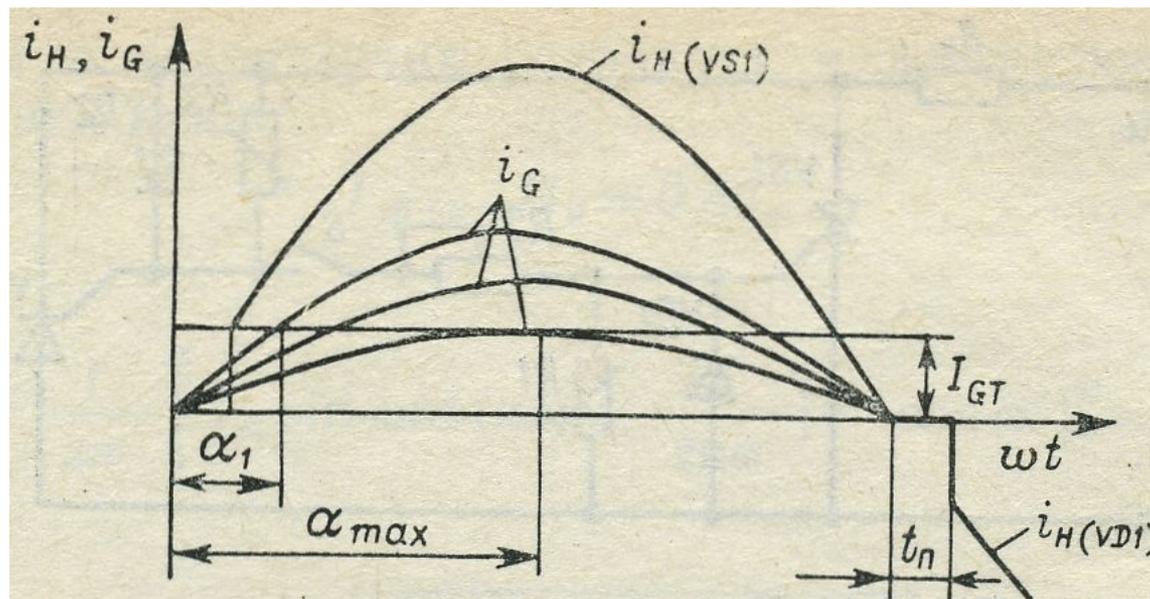
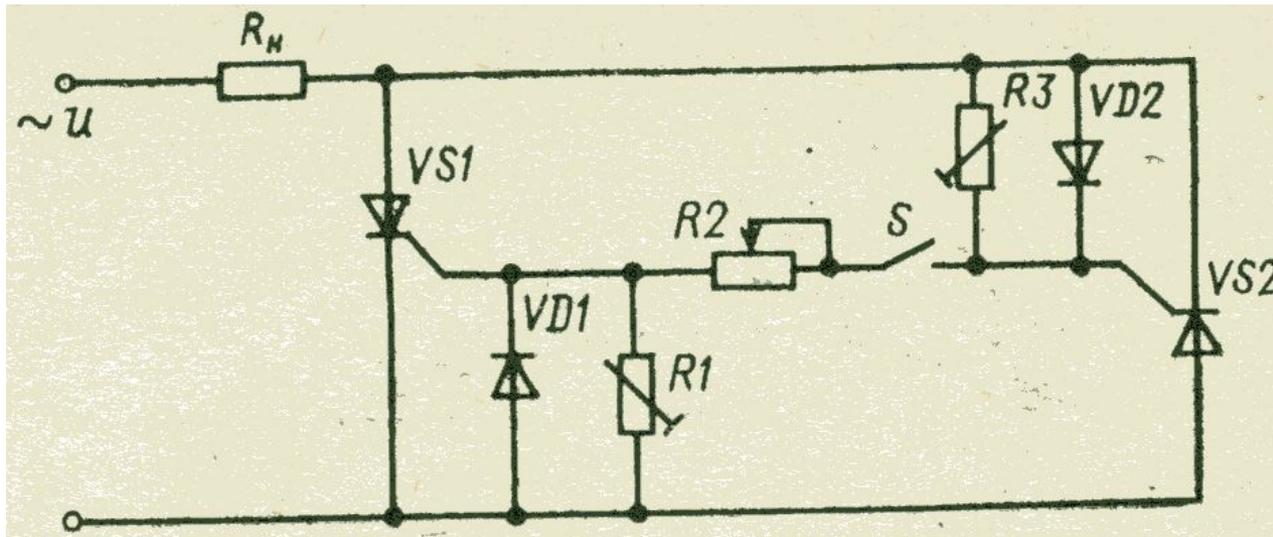
Выключатели переменного тока



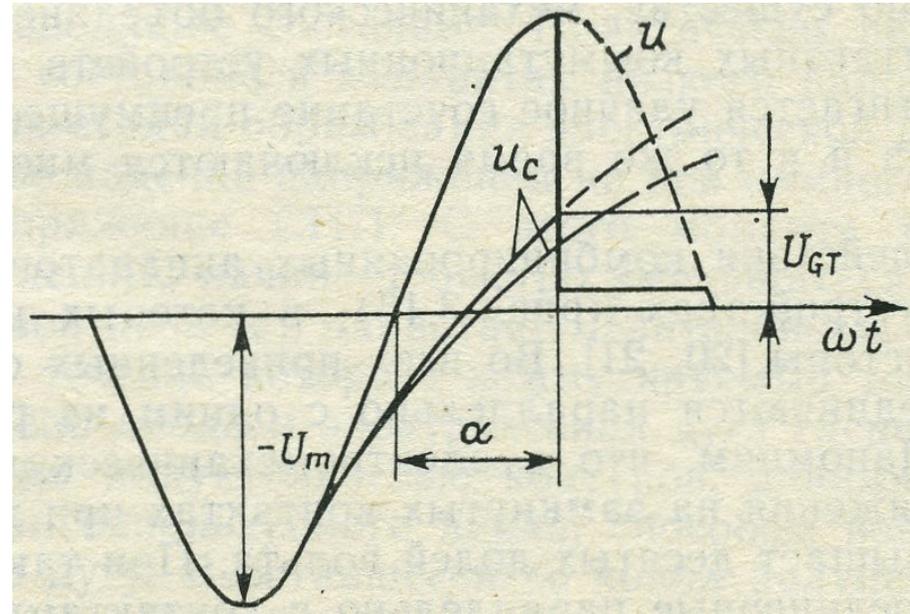
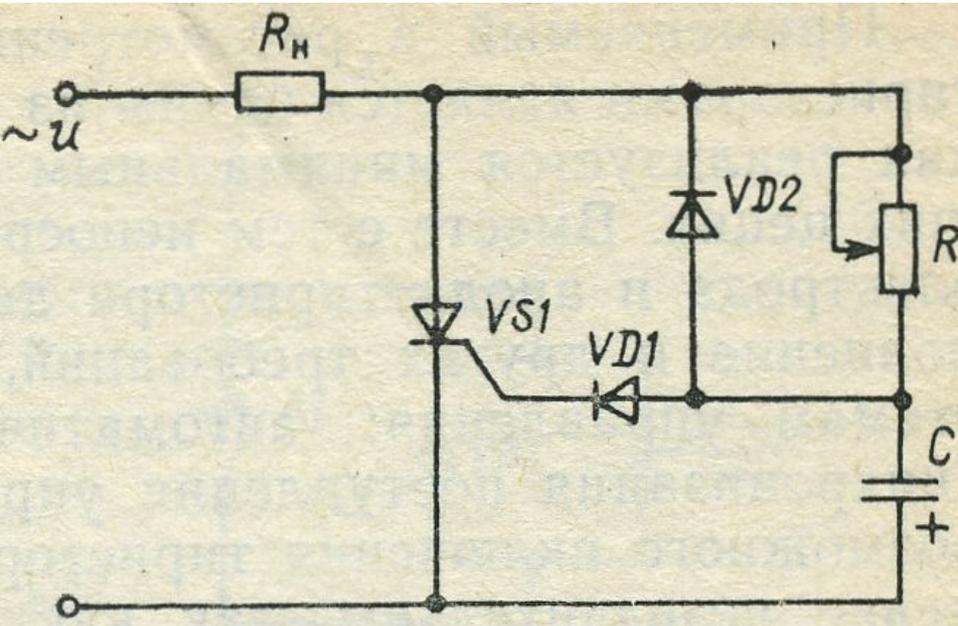
$$I_{cp (VS)} = 0,9 I_H$$



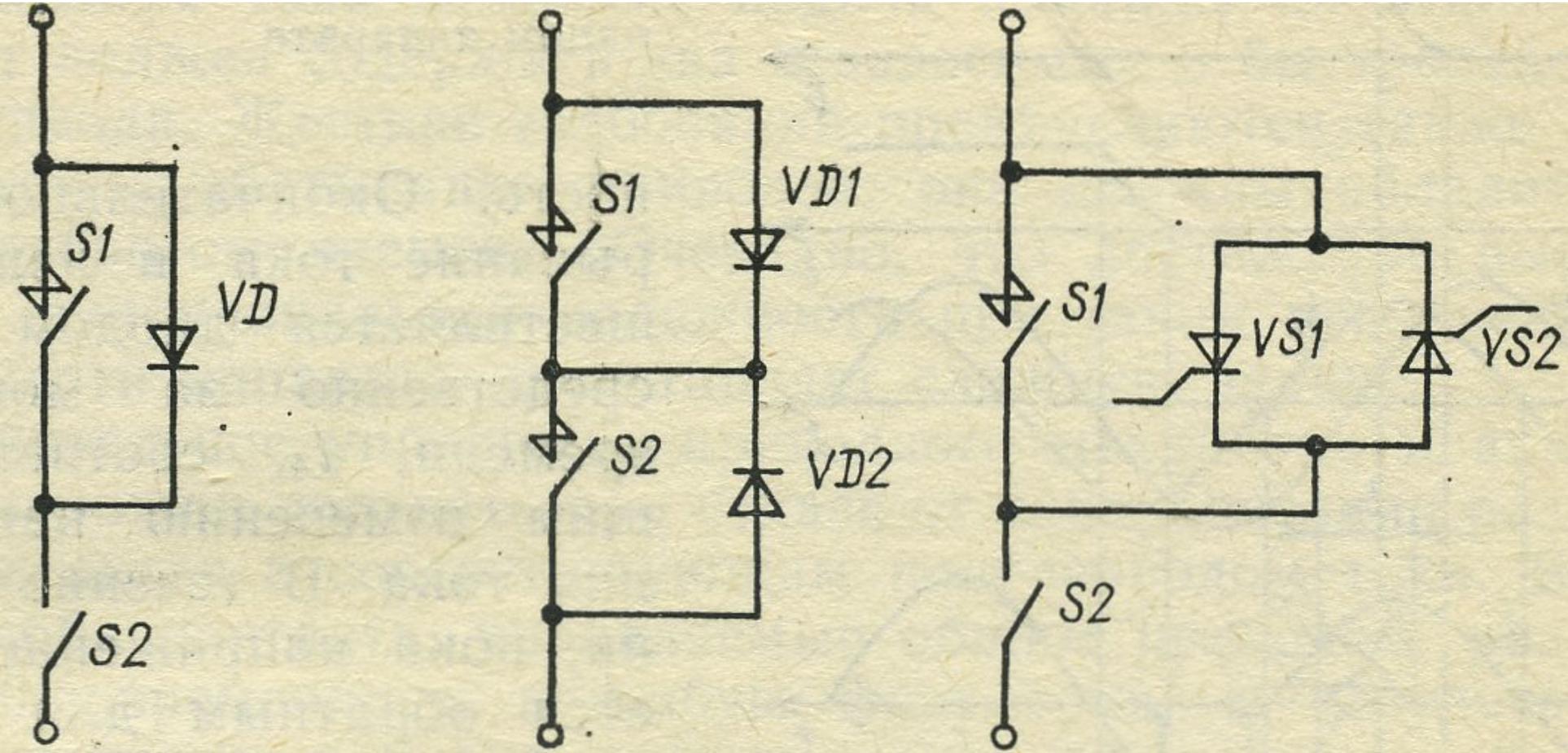
Контактор переменного тока



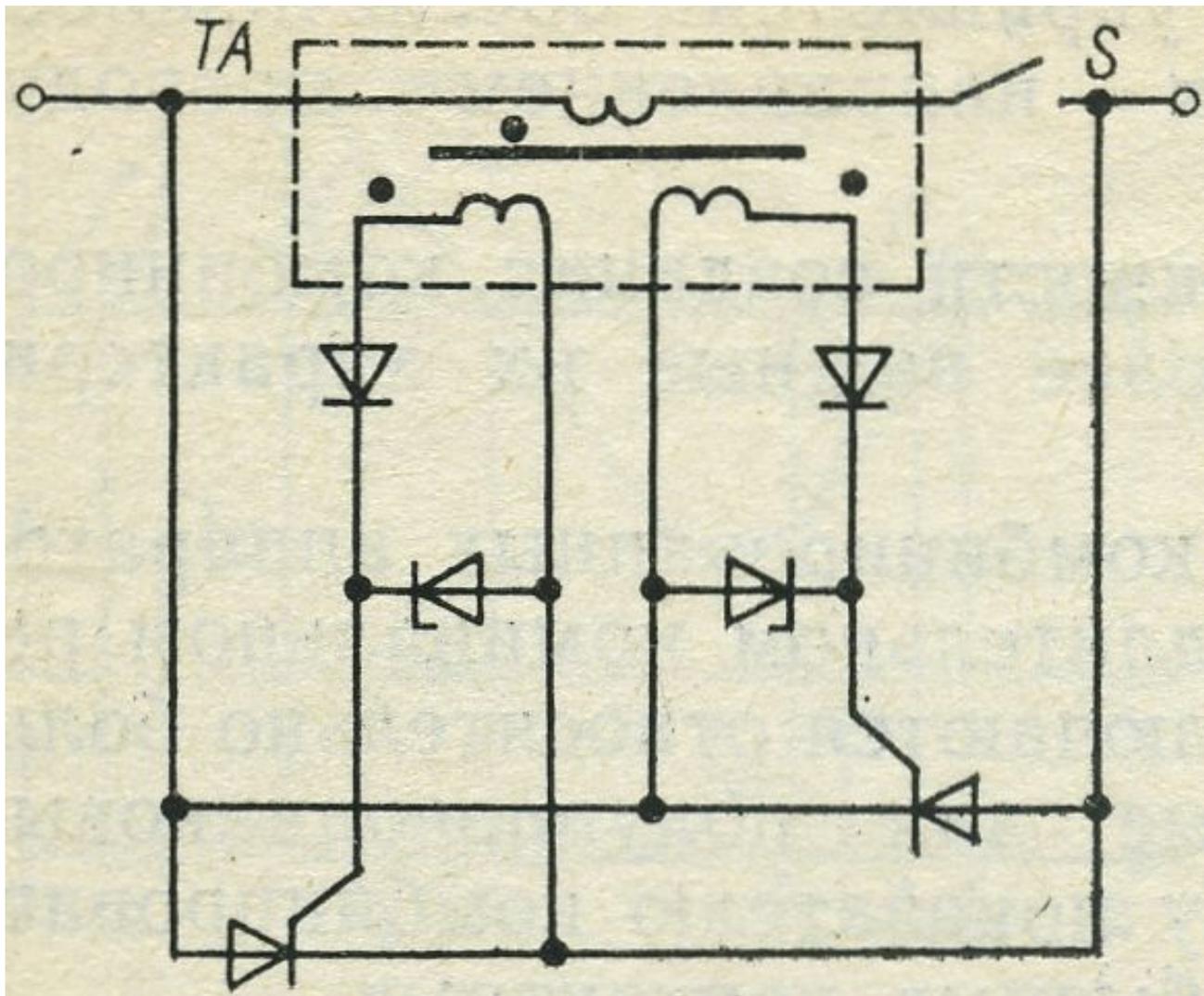
Выключатель с фазовым регулированием тока



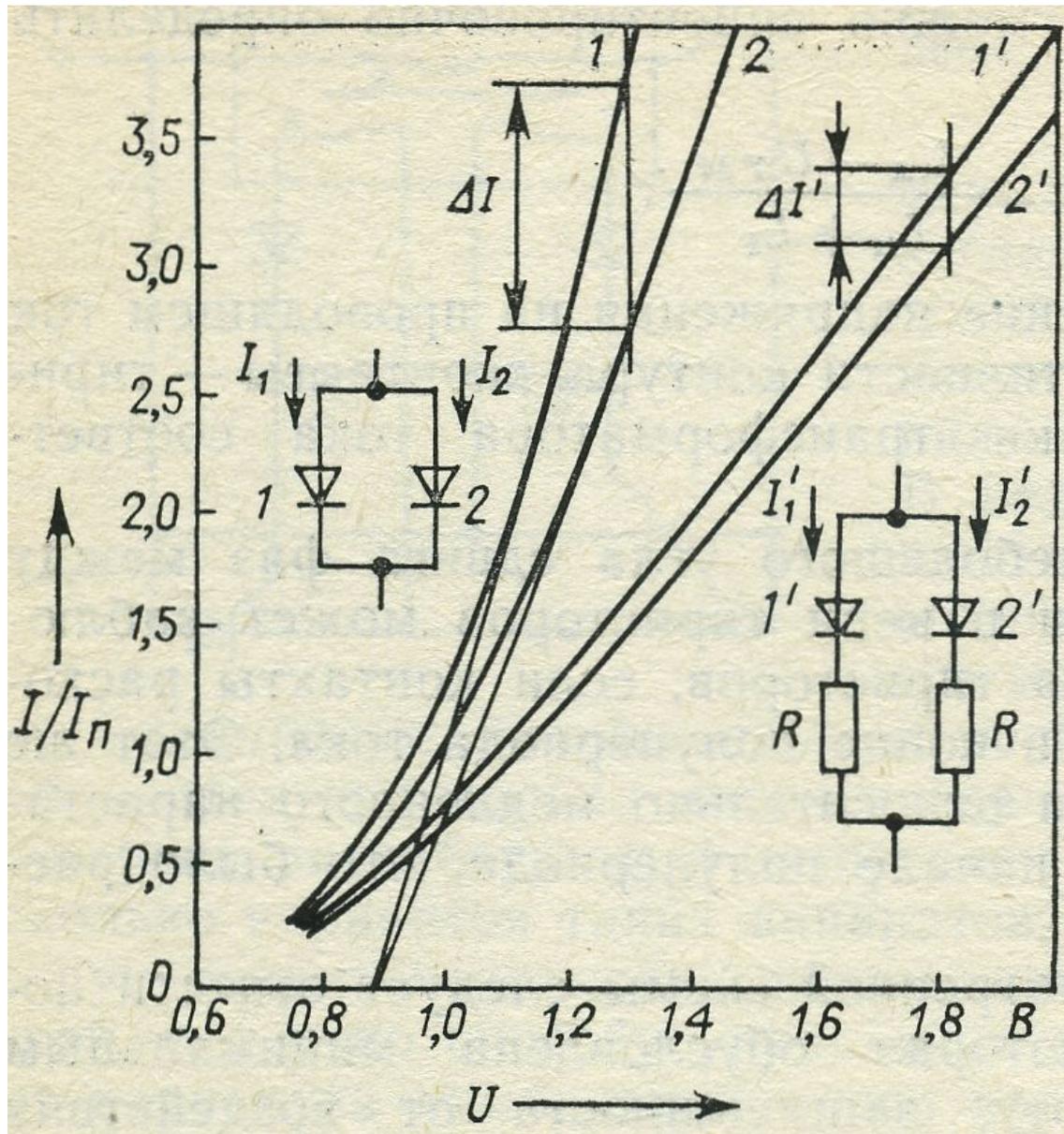
Комбинированные (гибридные) аппараты



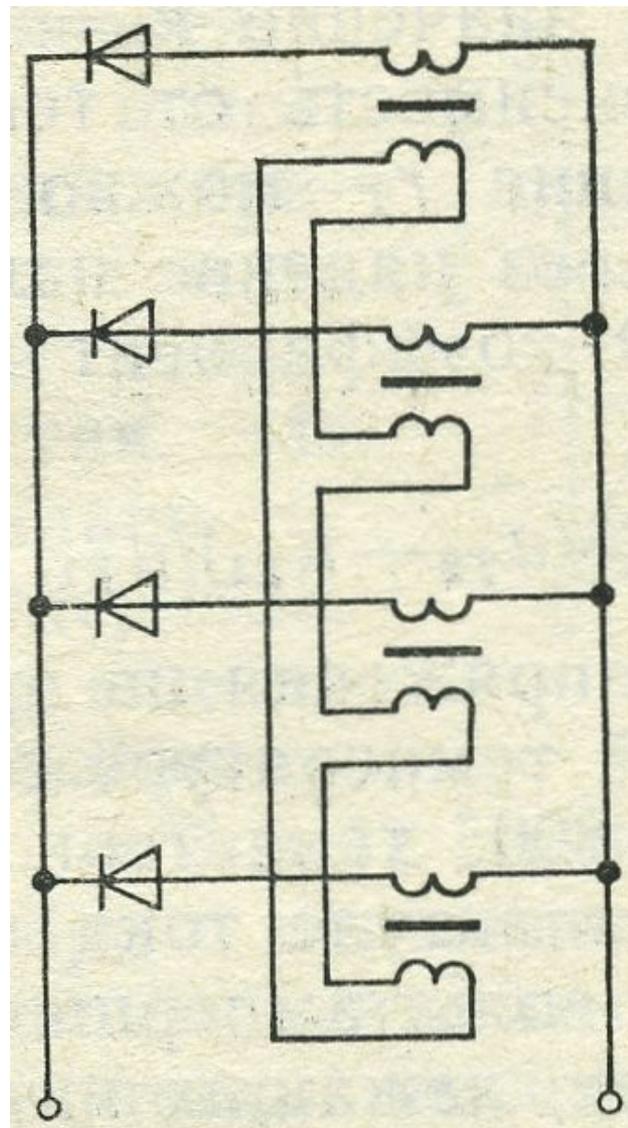
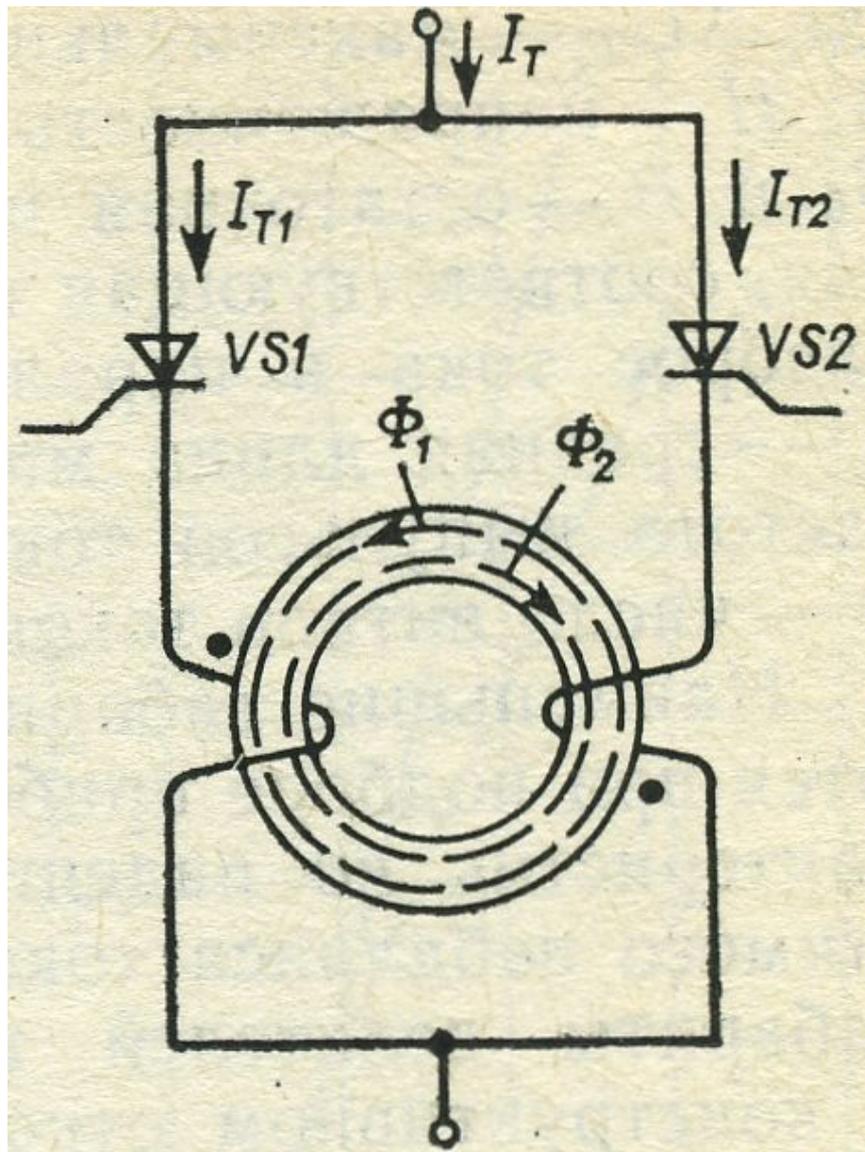
Гибридный контактор



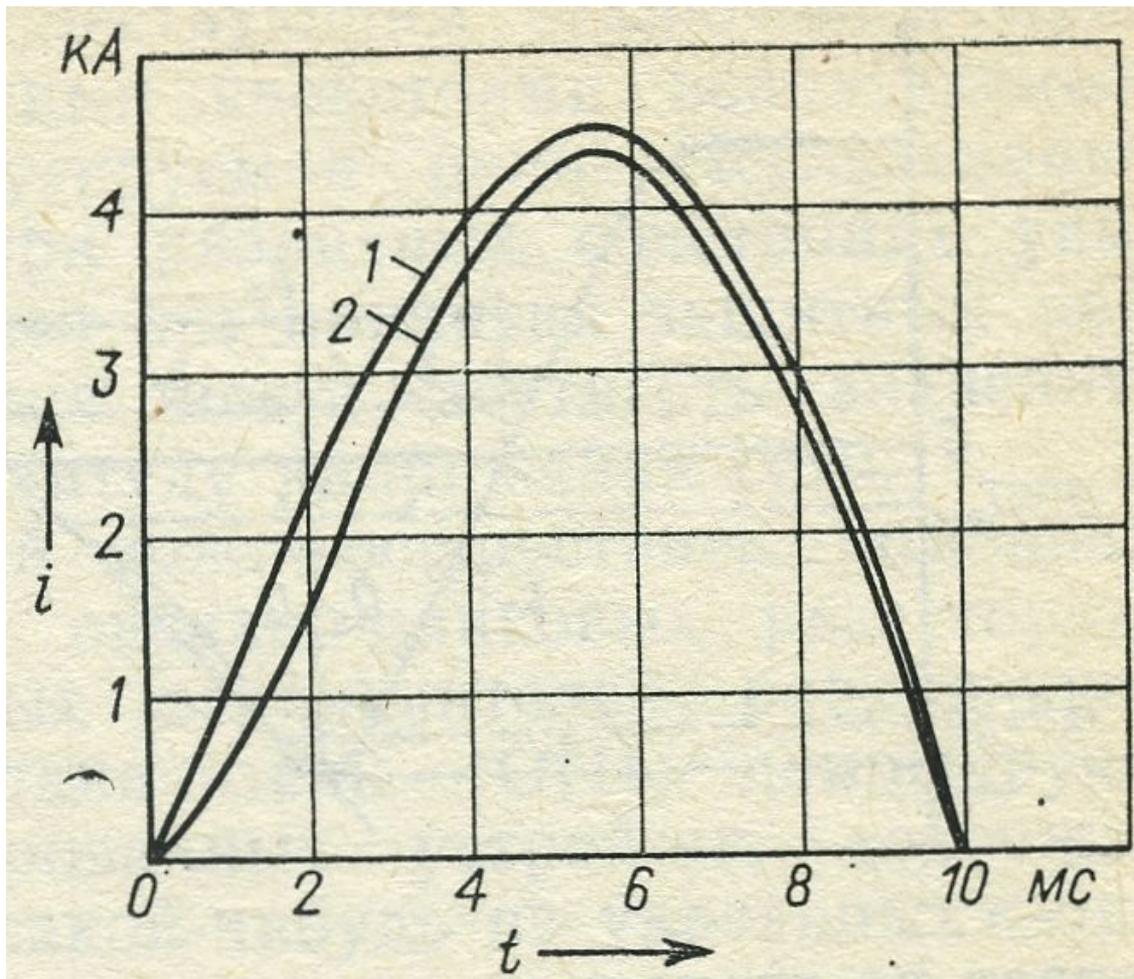
Параллельное соединение СПП



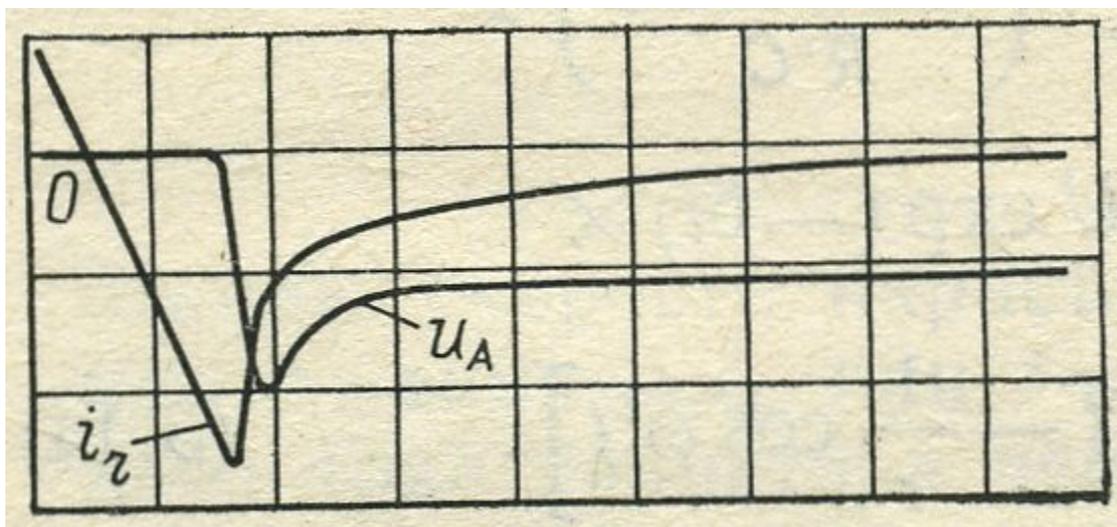
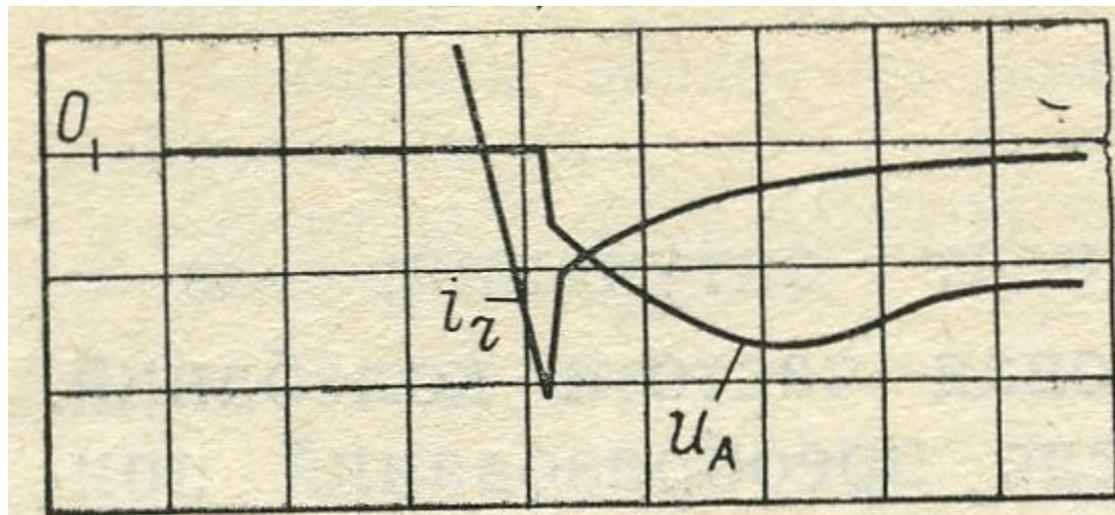
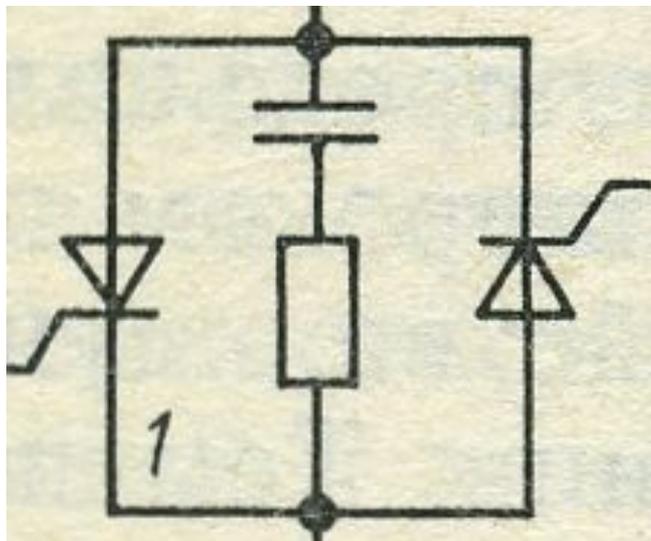
Индуктивный делитель тока



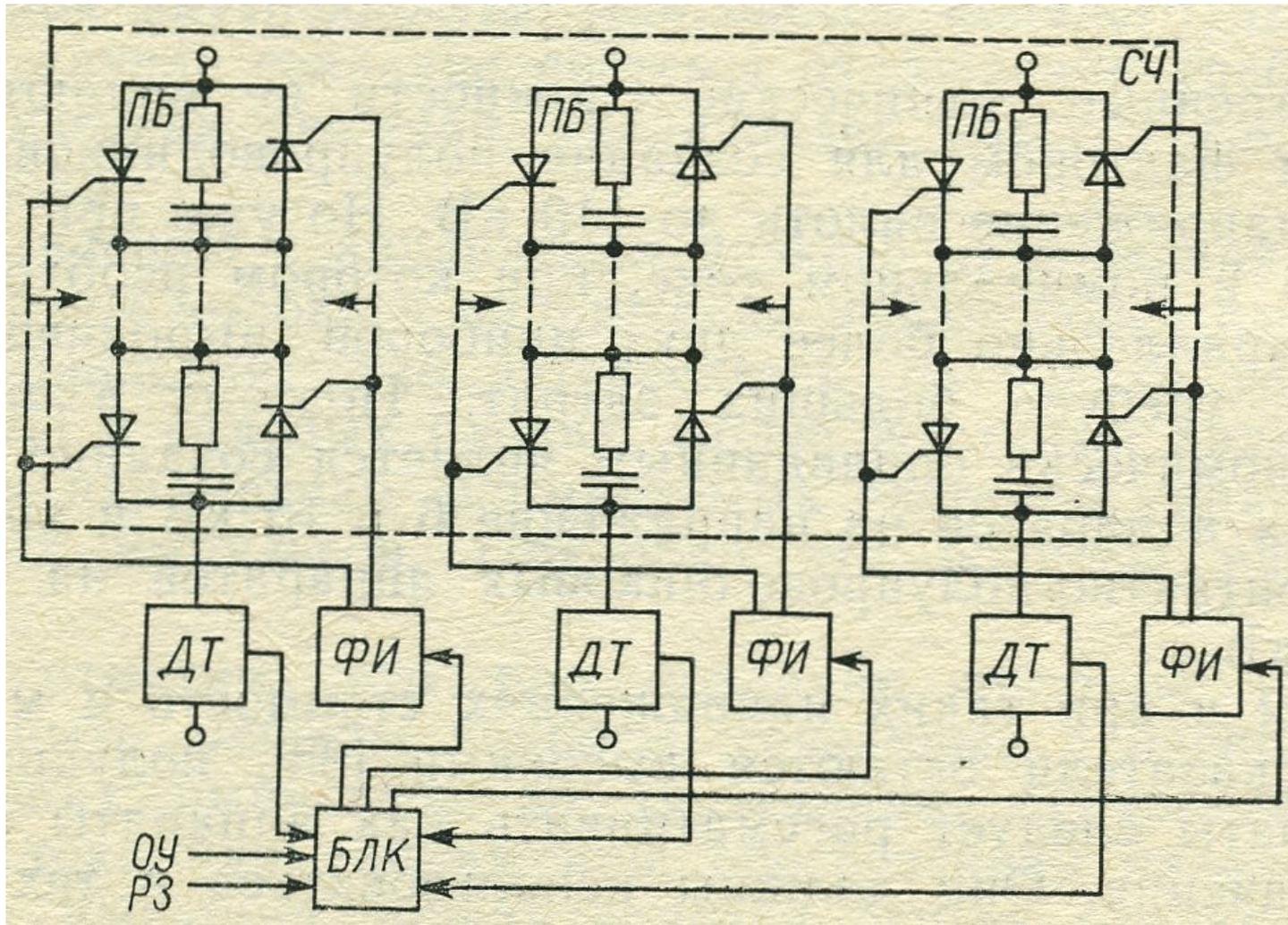
Влияние температуры на пере- распределение тока



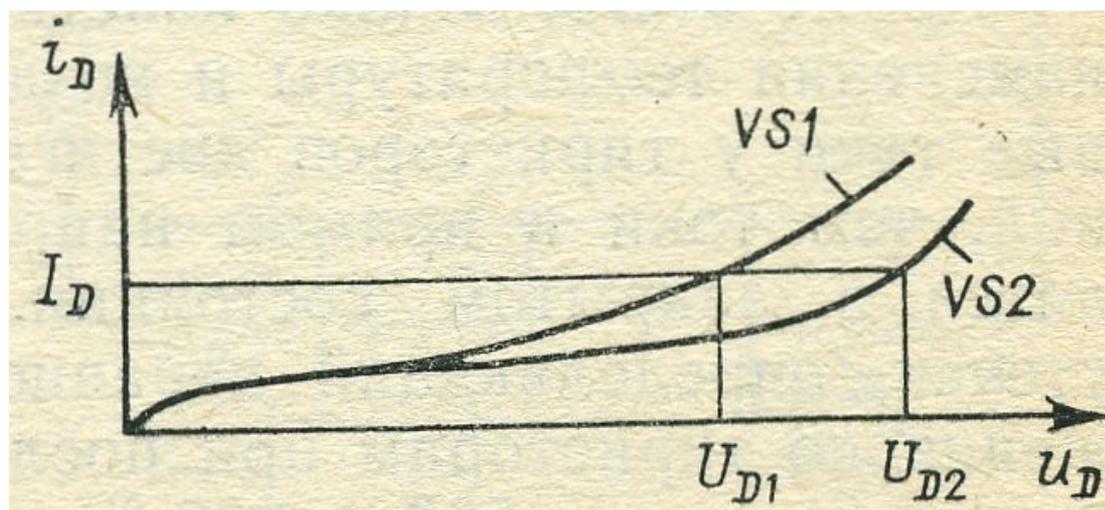
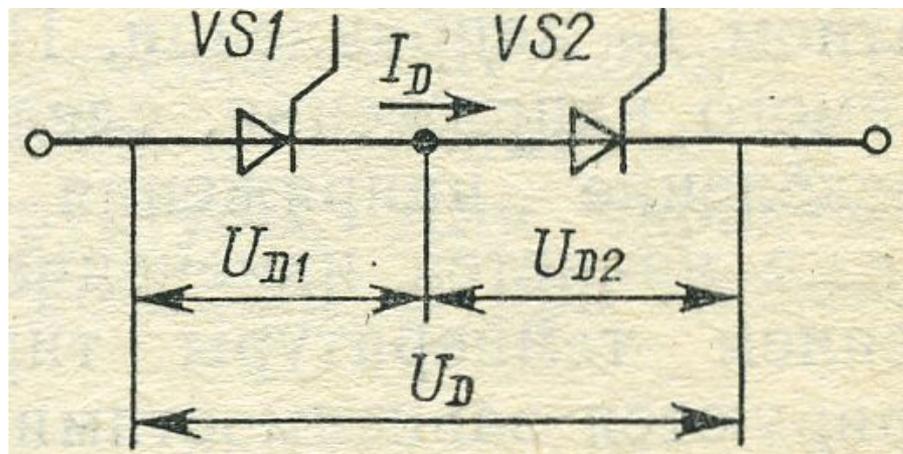
Защита СПП от перенапряжений

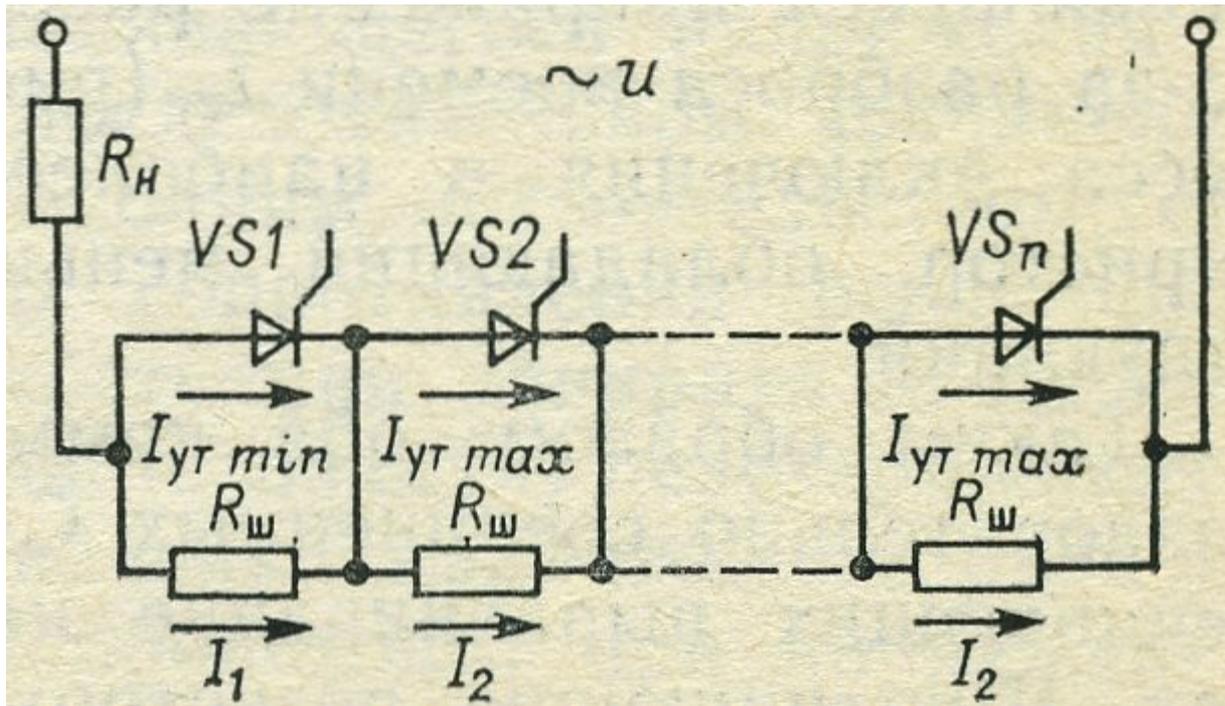


Полупроводниковые аппараты высокого напряжения



Последовательное соединение СПП

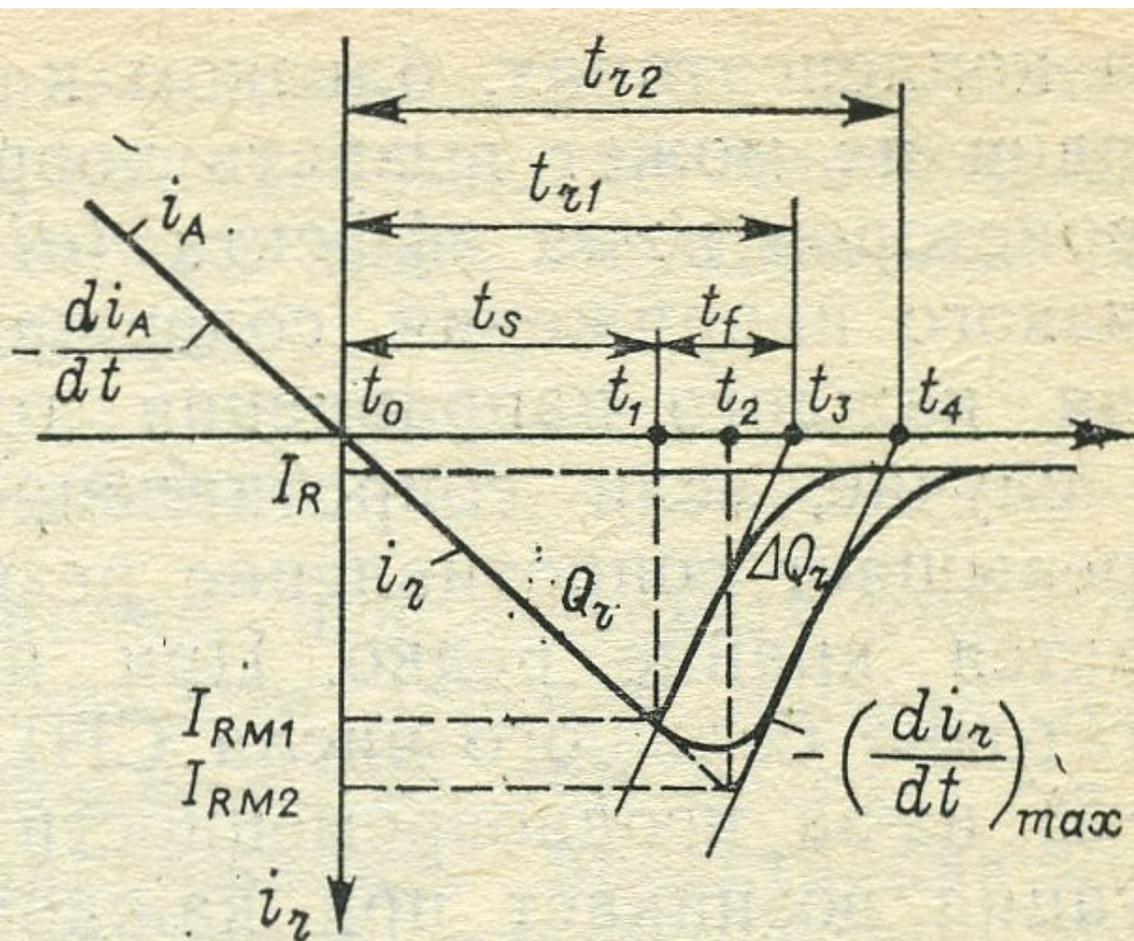




$$R_{ш} \geq \frac{n_U U - U_m}{(n_U - 1) \Delta I_{yT}}$$

U – максимально допустимое напряжение на одном тиристоре;
 U_m – максимально допустимое напряжение на тиристорном блоке;
 n_U – количество тиристоров; $I_{yT} = I_{yT \max} - I_{yT \min}$

Восстановление запирающей способности послед. соединенных тиристоров

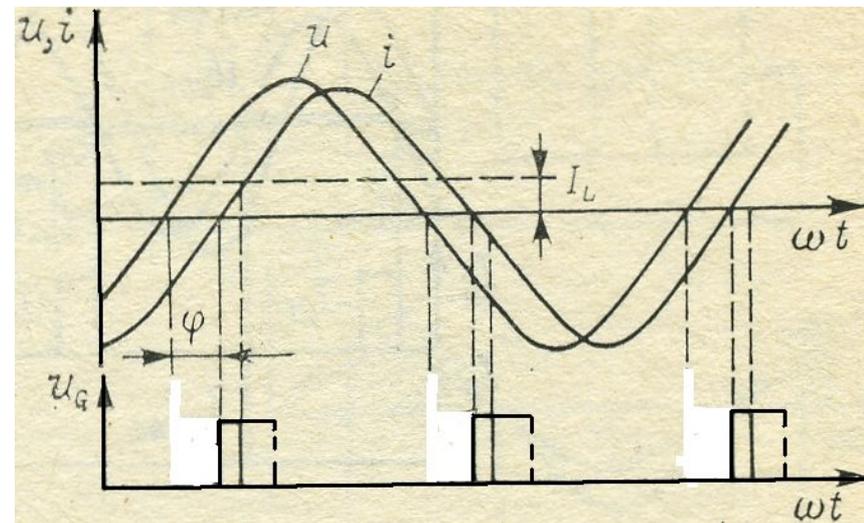
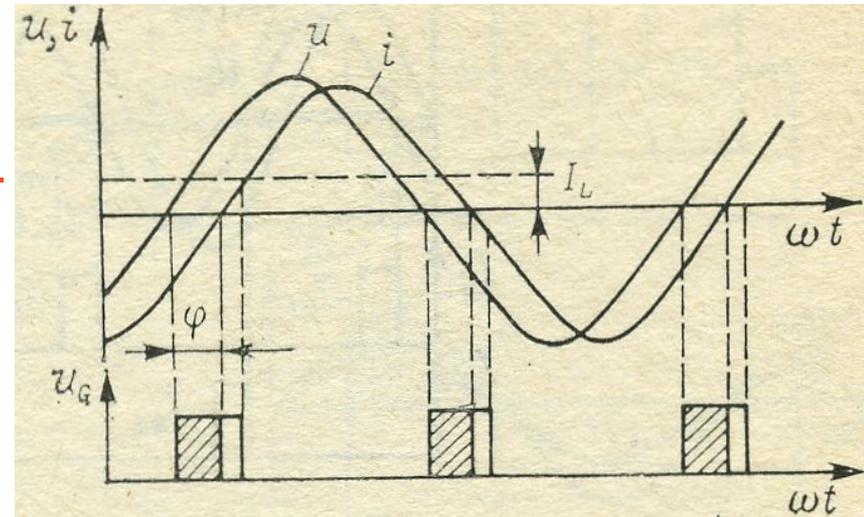
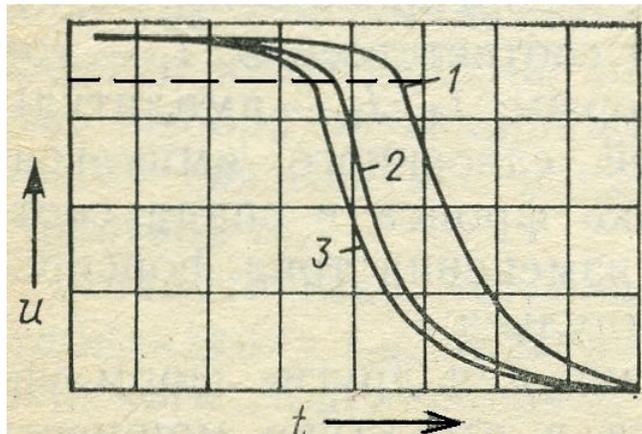
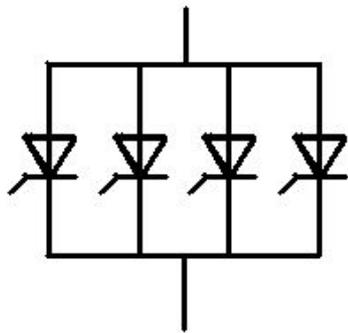


$$C_D \geq \frac{(n_U - 1) \Delta Q_r \cdot 10^{-6}}{n_U U - U_m}$$

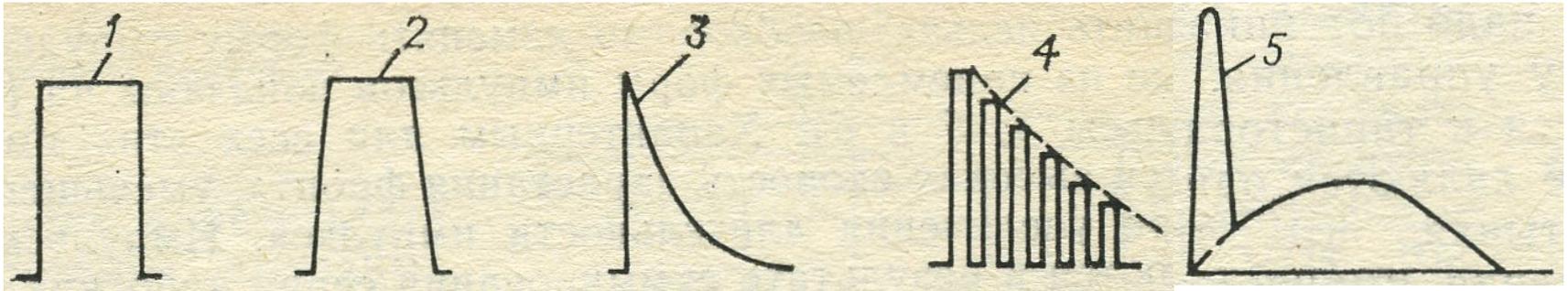
Системы управления тиристорами

Требования, предъявляемые к импульсам управления:

- Амплитуда тока и напряжения,
- Длительность импульса,
- Скорость нарастания тока управления

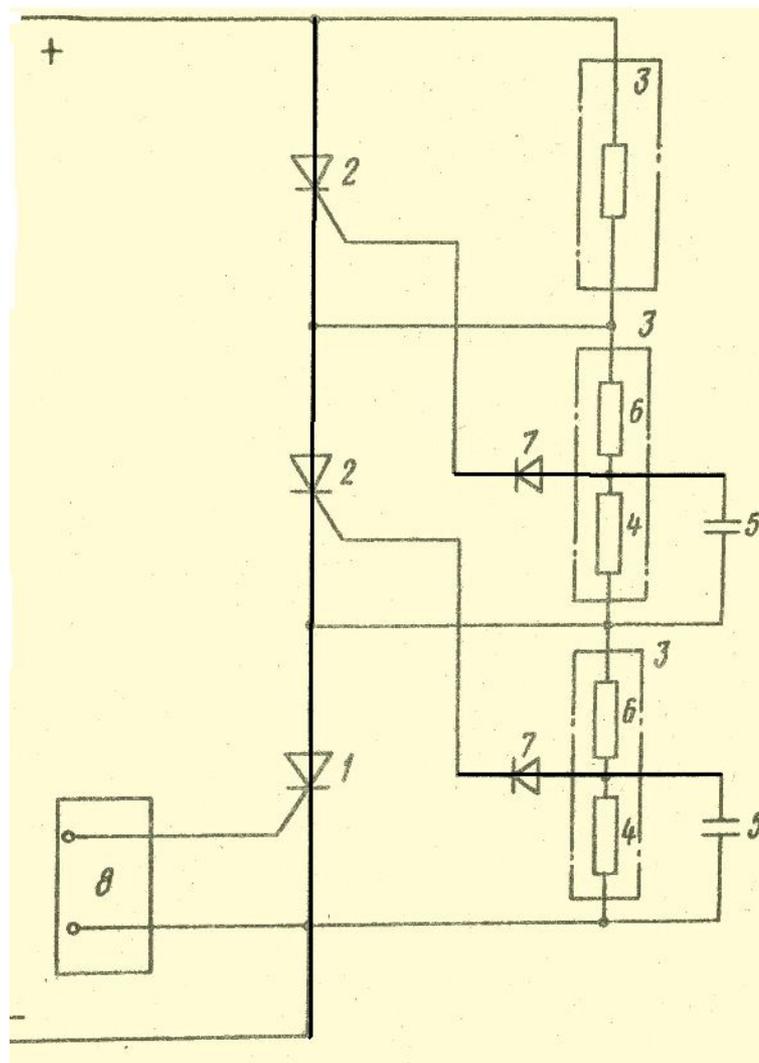


Формирователи импульсов управления

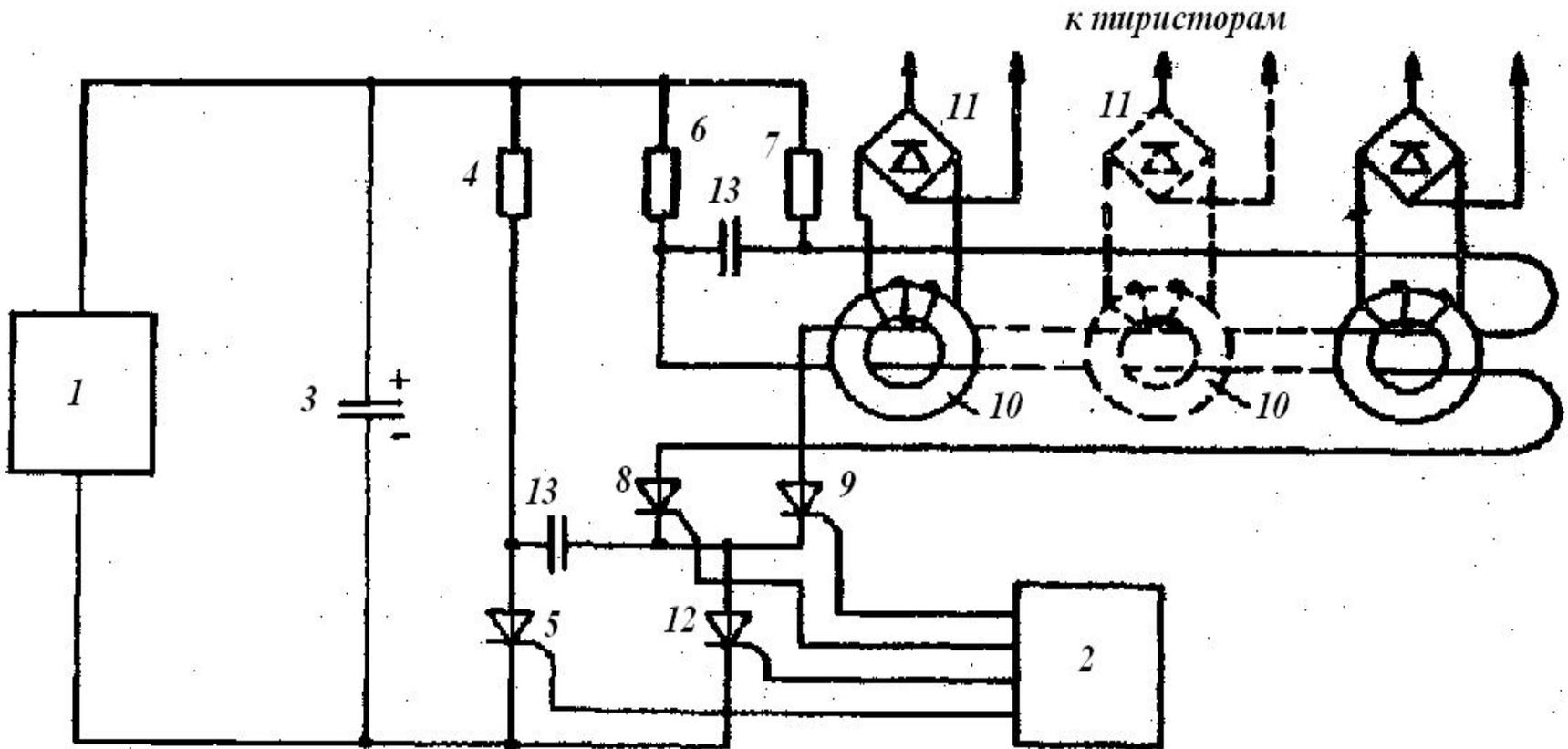


- Прямоугольный,
- Трапецеидальный,
- Треугольный,
- экспоненциальный

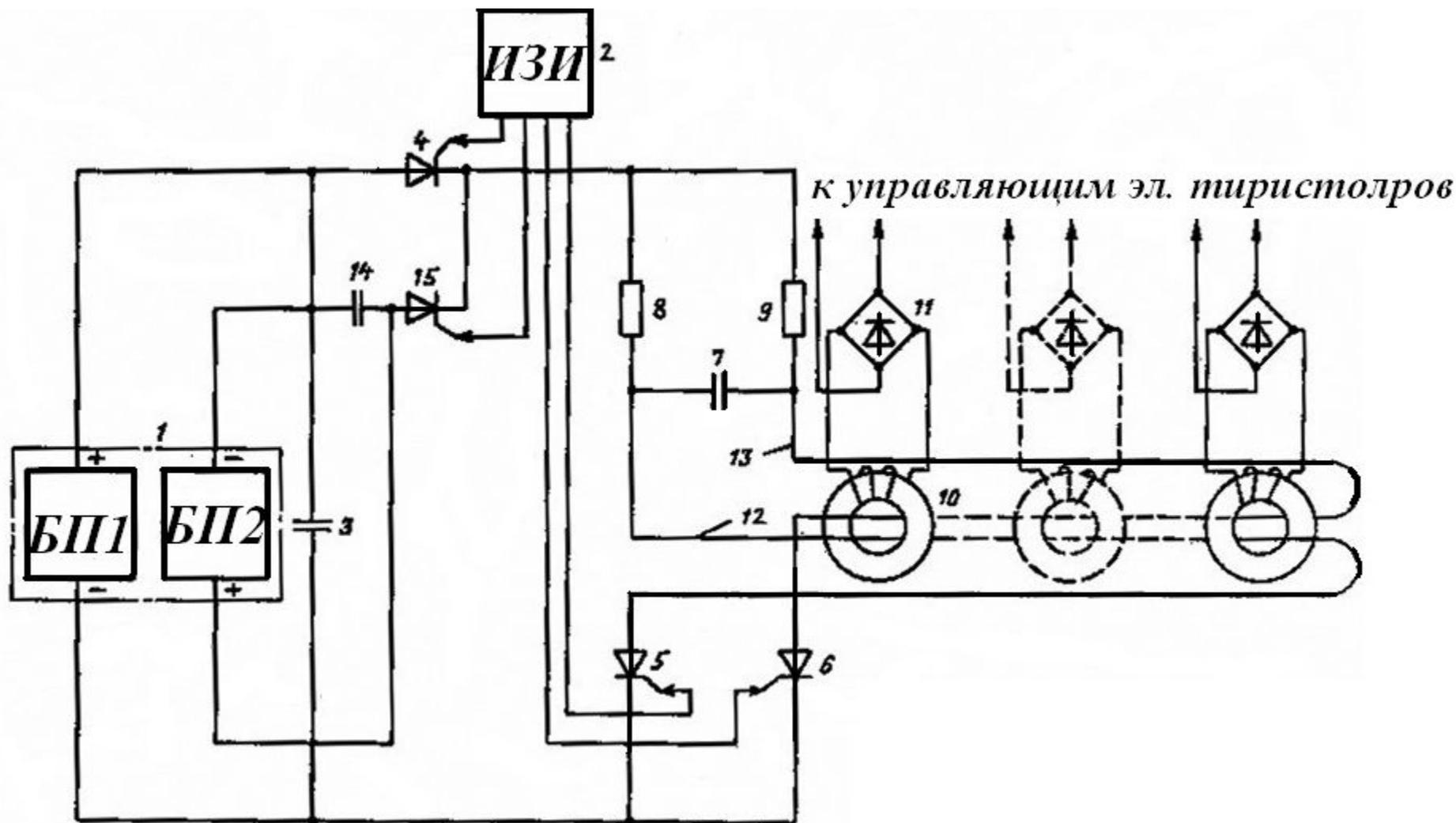
Управление последовательно соединенной группой тиристоров



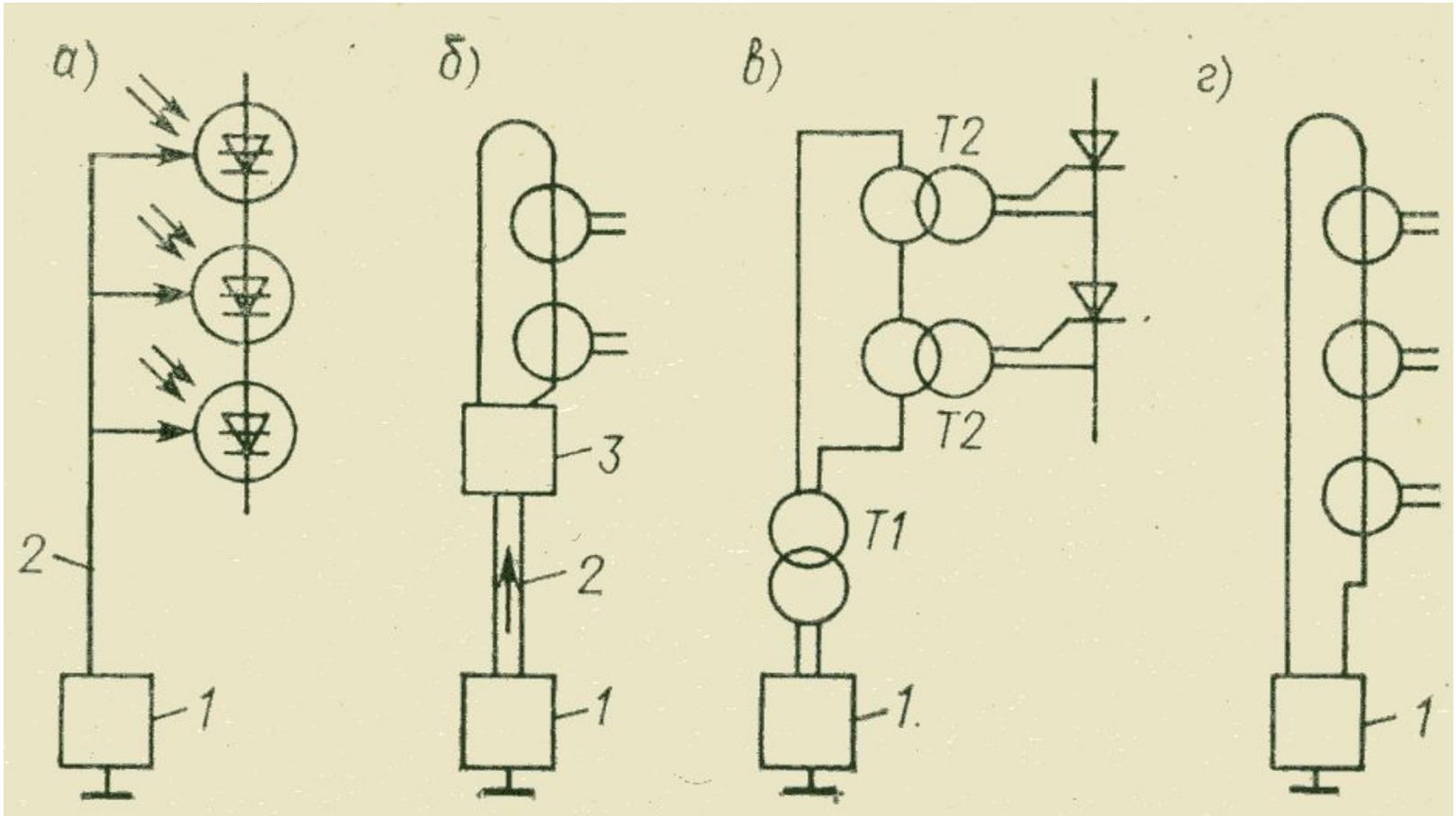
Одновременное управление большой группой тиристоров



Одновременное управление большой группой тиристоров



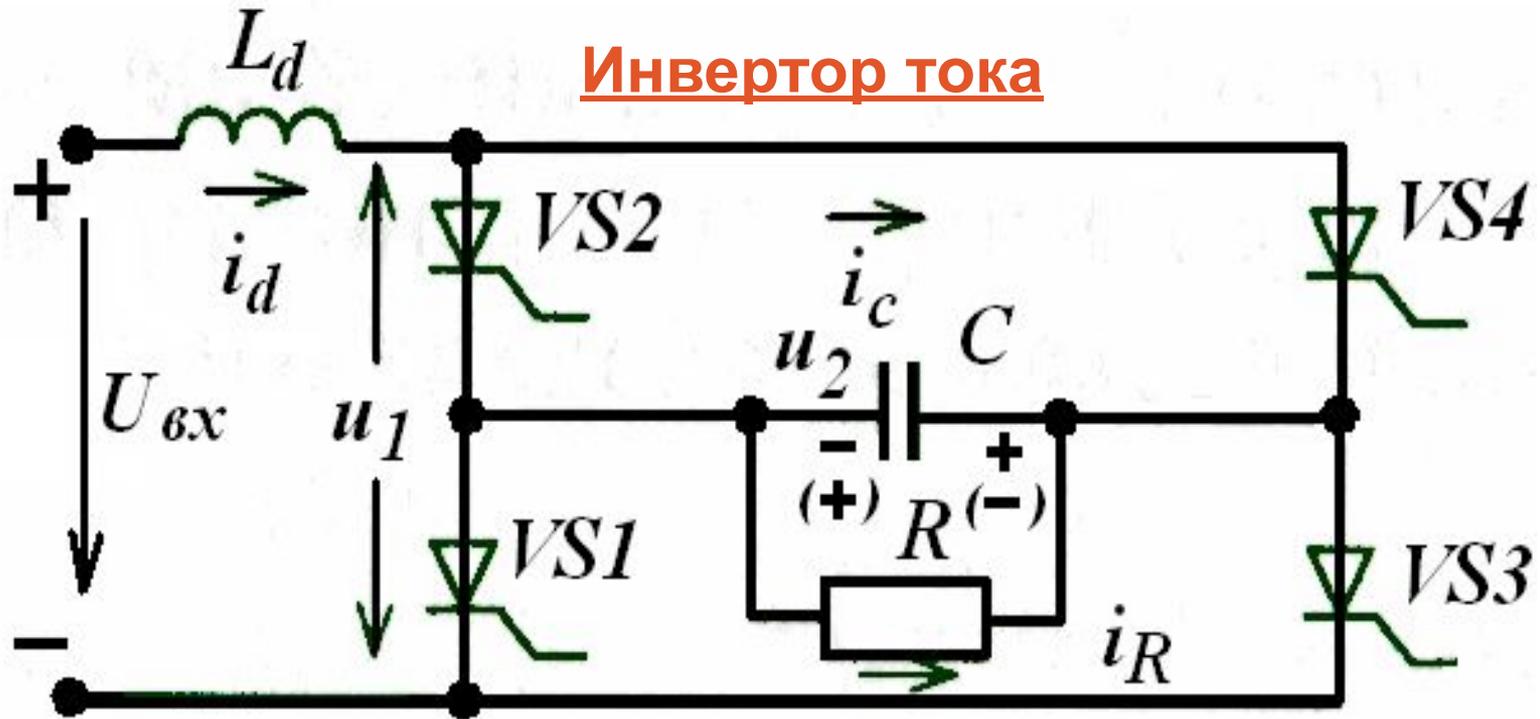
Способы управления высоковольтными выключателями



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

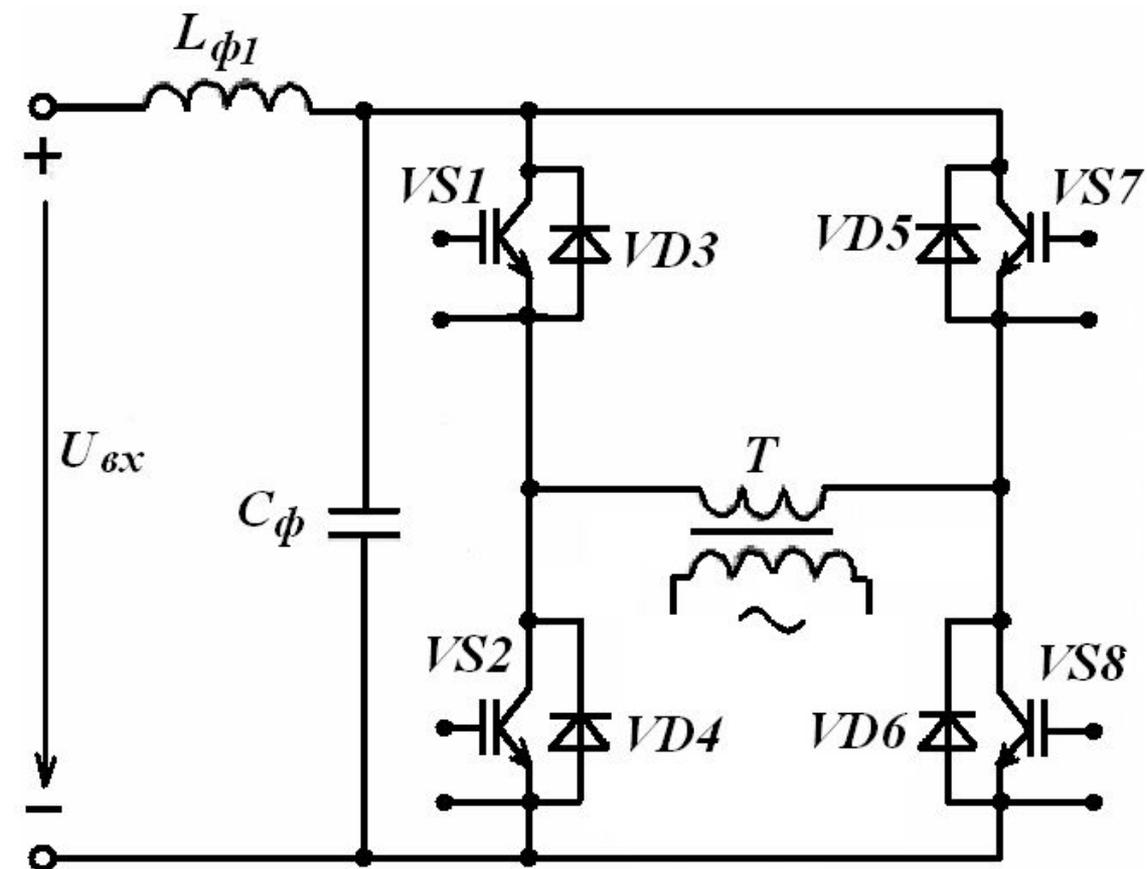
- – в выпрямительном и инверторном режимах с естественной коммутацией, обеспечивающие передачу энергии в обоих направлениях и связывающие цепь переменного тока с цепью постоянного тока
- – преимущественно в инверторном режиме с принудительной коммутацией, связывающие цепь постоянного тока с цепью переменного тока;
- – в режимах переключения постоянного тока с принудительной коммутацией, разделяющие две цепи постоянного тока;
- – в режимах прерывания переменного тока с естественной или принудительной коммутацией, разделяющие две цепи переменного тока одной частоты;
- – в режимах преобразования частоты с естественной и принудительной коммутацией (непосредственный преобразователь частоты), связывающие цепи переменного тока с разной частотой;
- – комбинированные режимы, обусловленные комбинацией различных преобразователей (преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, преобразователи постоянного тока с промежуточным высокочастотным звеном).

Инверторы тока - преобразуют энергию постоянного тока в энергию переменного тока с заданной частотой и амплитудой выходного напряжения

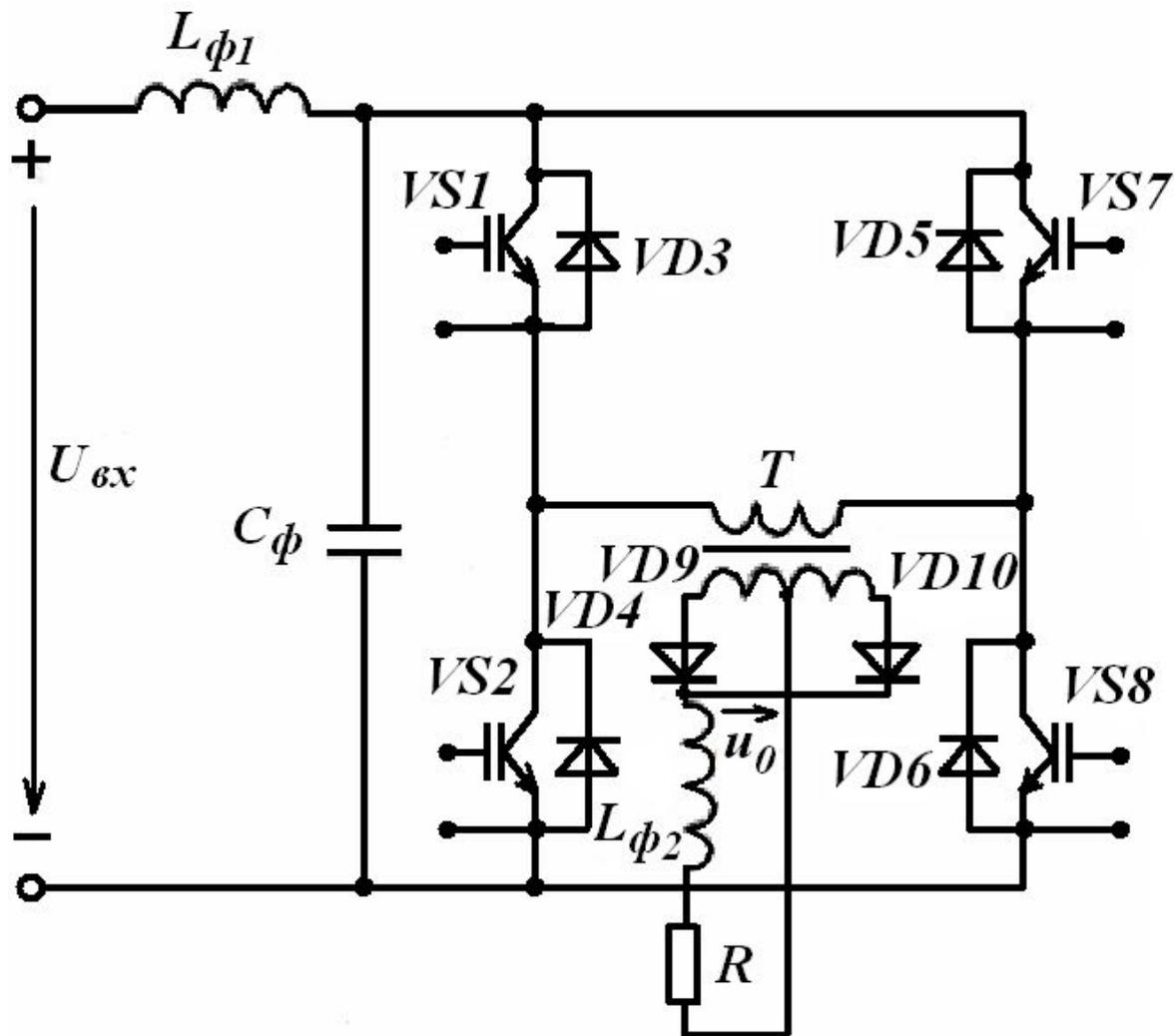


$$C \geq (1 \dots 1, 4) \frac{i_R t_b}{U_c}$$

Транзисторный инвертор напряжения



Транзисторный инвертор напряжения с выходом на постоянном токе



Среднее значение выходного напряжения выпрямителя и тока нагрузки

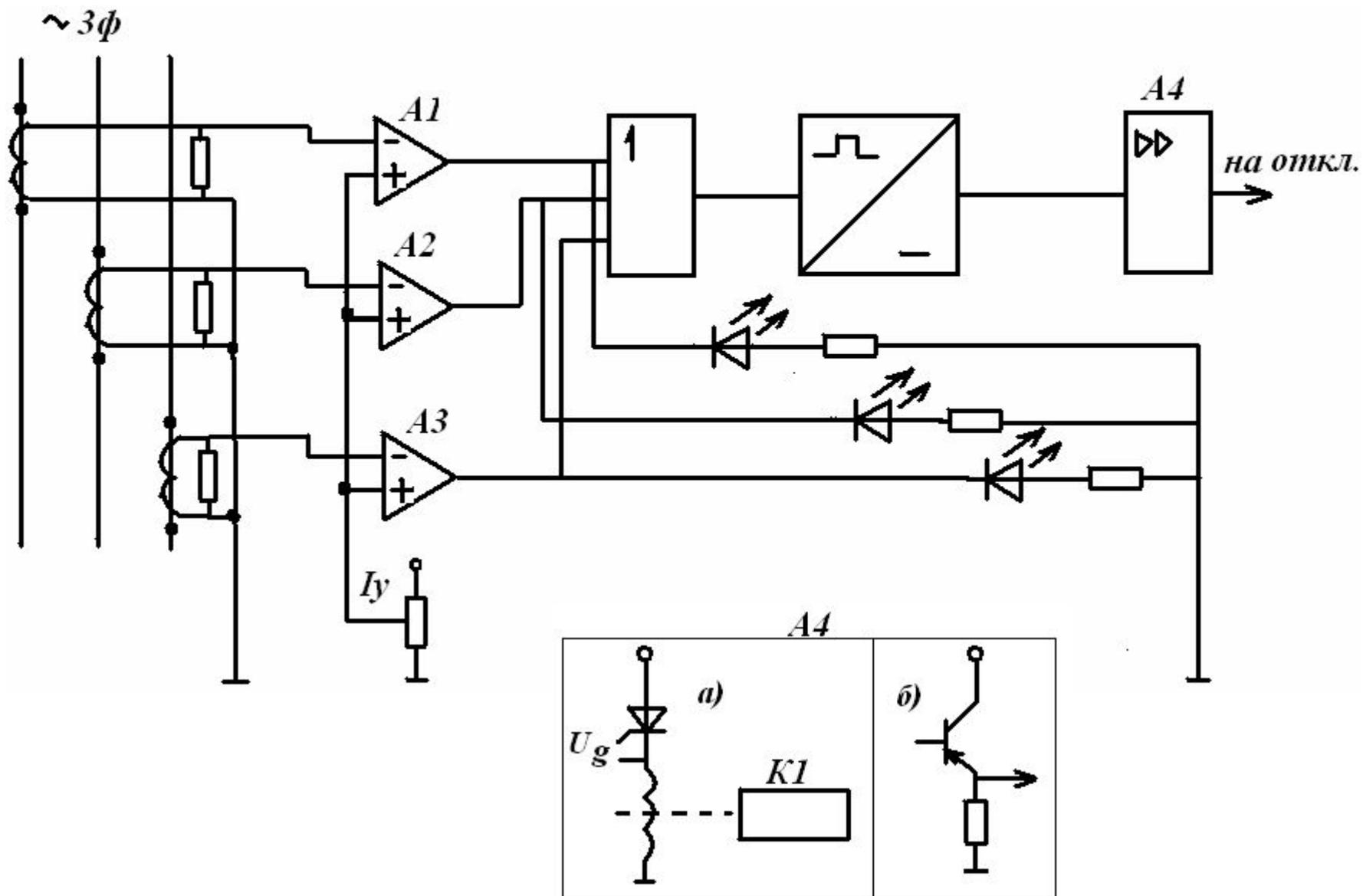
$$U_0 = \frac{U_{вх} \cdot w_2 \cdot 2t_{uy}}{w_1 \cdot T}$$

$$I_0 = I_{R0} = \frac{U_{вх} \cdot w_2 \cdot 2t_{uy}}{w_1 \cdot T \cdot R}$$

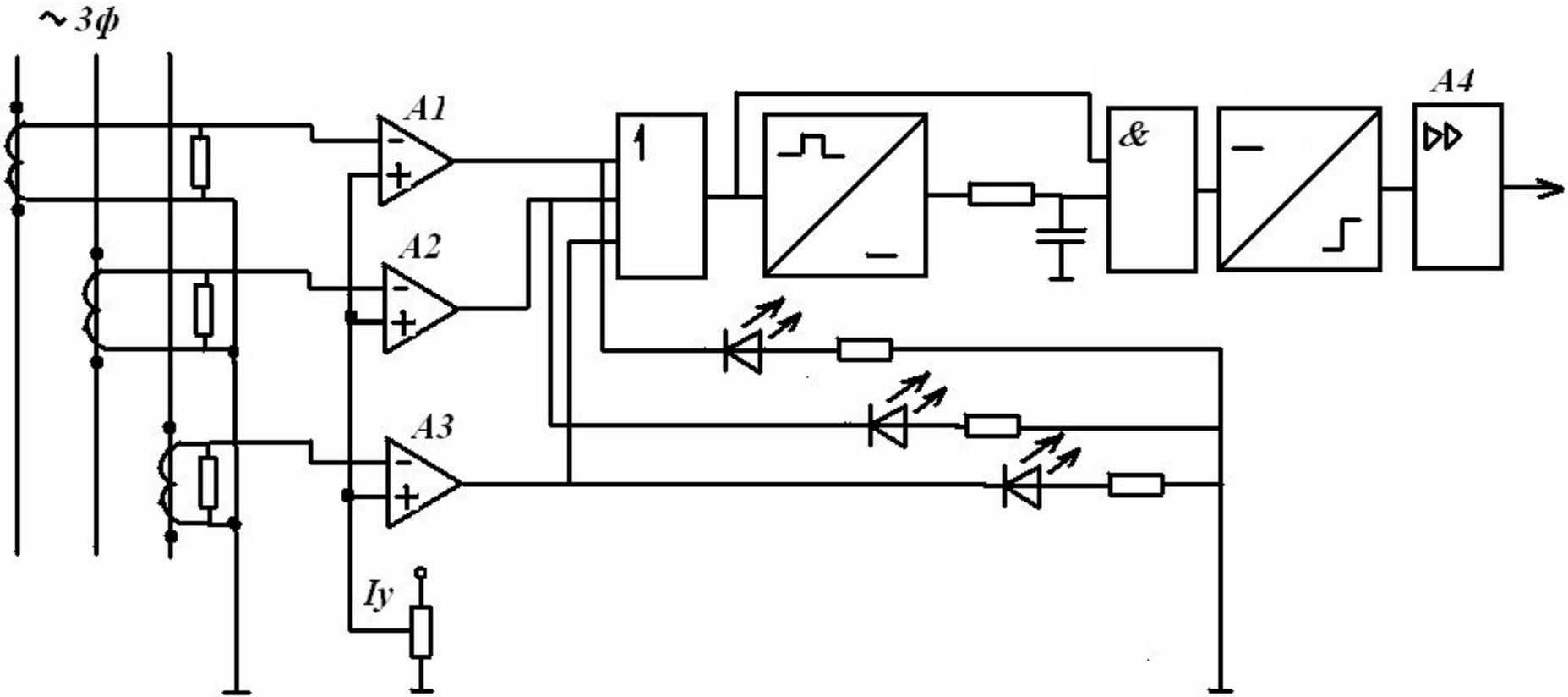
w_1 w_2

t_{uy}

Трехфазное реле тока



Реле тока с выдержкой времени



Реле минимального напряжения

