СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Один семестр – 5-ый.
Лекции – 18 часов.
Практические занятия-18 часов.
Лабораторные работы – 18 часов.
ИТОГО аудиторной нагрузки – 54 часа.
Зачет в конце семестра.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

- ***Основная***
- **Розанов Ю. К**.Силовая электроника: учебник для вузов/ Розанов Ю. К., Рябчицкий М.В., Краснюк А.А.; 2-е изд., стер.- М.: МЭИ, 2009.-632 с.
- **Попков О.З.** Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов/ Попков О.З.; 3-е изд. стер., - М.: МЭИ, 2010.- 200 с.
- **Лачин В.И.** Электроника: учеб. пособие для вузов/ Лачин В.И.; Савелов Н.С.; Ростов н/Д: Феникс, 2009ю – 703 с.
- ***Дополнительная***
- **Гейтенко Е.Н.** Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учеб. пособие для вузов/ Гейтенко Е.Н.; М.: СОЛОН-Пресс, 2008.-
- ***К лабораторным занятиям***
- **Н.Ф. Твердохлебов**. Лабораторный практикум по курсам «Физические основы электроники» и «Силовая электроника»/ ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2005.- 76 с.
- **Г.Я. Пятибратов** Общие методические указания к выполнению лабораторных работ.- Новочеркасск: НПИ, 1983 .- 11 с.

Цели и задачи изучения дисциплины

- *Цель преподавания дисциплины-* получение студентами основных научно-практических, общесистемных знаний в области современной силовой электроники и преобразователях электрической энергии.
- *Задачи дисциплины*. Изучение вопросов применения силовой электроники и преобразовательной техники.

ВВЕДЕНИЕ

- **выпрямители**, преобразующие переменный ток в постоянный;
- **инверторы**, преобразующие постоянный ток в переменный;
- **преобразователи частоты**, преобразующие переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты;
- **импульсные преобразователи постоянного или переменного тока**, преобразующие постоянный или переменный ток одного напряжения в постоянный или переменный ток другого напряжения.

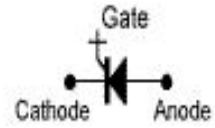
Менее распространенные преобразователи:
-числа фаз,
-формы кривой тока и др.
В отдельных случаях используется комбинация нескольких видов преобразователей.
Преобразователи могут быть:
-электромашинные;
-электронные.

СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ЗАПИРАЕМЫЕ ТИРИСТОРЫ

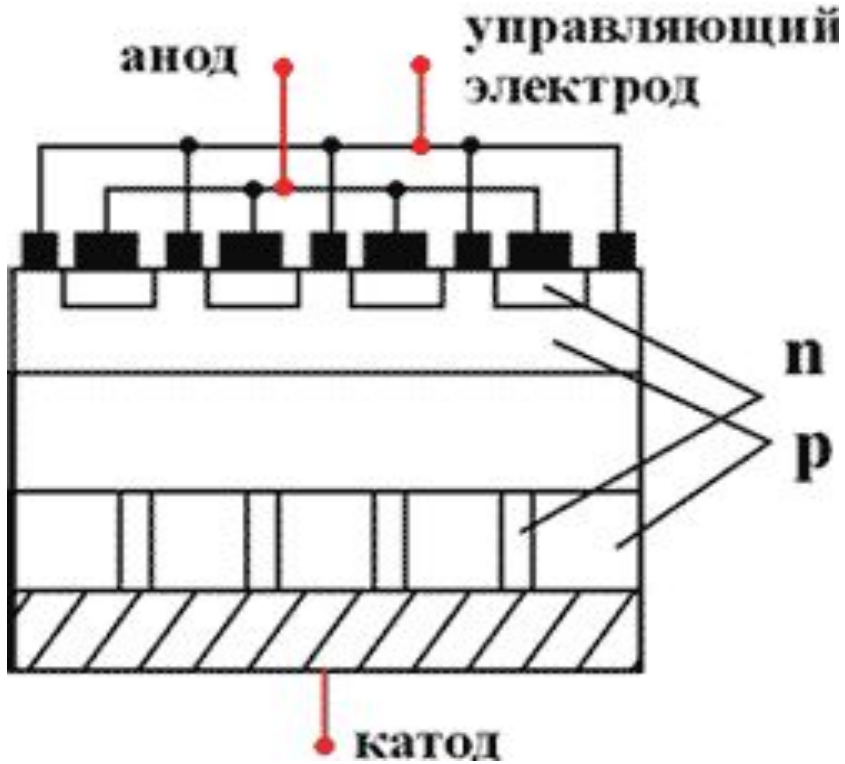
В 1955 г. был впервые создан полупроводниковый управляемый прибор, имеющий четырёхслойную структуру и получивший название «тиристор».

Запираемые тиристоры появился в 1960 г. в США. Они получили название Gate Turn Off (GTO) (запираемые или выключаемые тиристоры).

В середине 90-х годов были разработаны запираемые тиристоры с кольцевым выводом управляющего электрода. Они получили название Gate Commutated Thyristor (GCT) и стали дальнейшем развитием GTO-технологии.



Условное обозначение запираемого тиристора



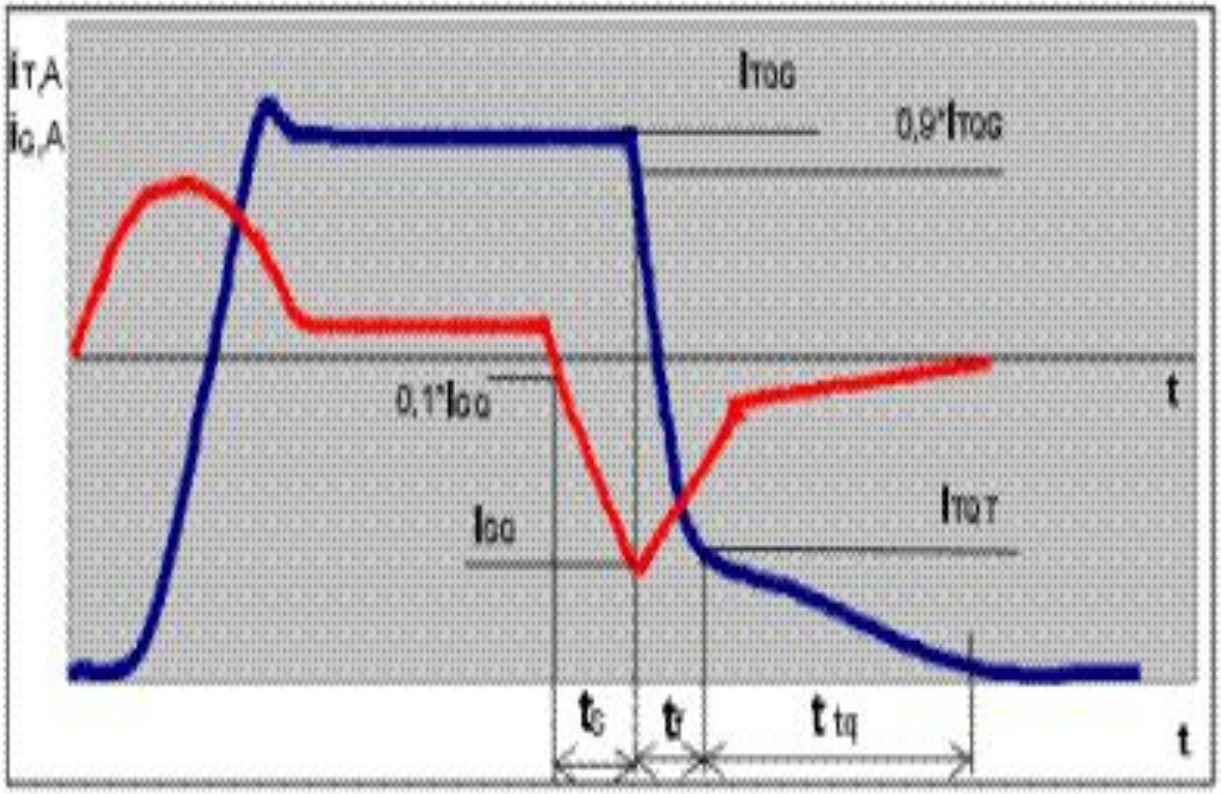
Структурная схема запираемого тиристора

Основное исполнение тиристоров GTO таблеточное с четырёхслойной кремниевой пластиной.

Она зажата через термокомпенсирующие молибденовые диски между двумя медными основаниями, обладающими повышенной тепло- и электропроводностью.

С кремниевой пластиной контактирует управляющий электрод, имеющий вывод в керамическом корпусе.

Прибор зажимается контактными поверхностями между двумя половинами охладителей, изолированных друг от друга и имеющих конструкцию, определяемую типом системы охлаждения.



Графики изменения тока анода (iT) и управляющего электрода (iG)

Фаза 1 – включение.

Фаза 2 - проводящее

Фаза 3 – выключение.

Фаза 4 – блокирующее состояние.

Защитные цепи

Использование тиристоров GTO, требует примене-ния специальных защитных цепей.

Назначение любой защитной цепи – ограниче-ние скорости нарастания одного из двух параметров электрической цепи при коммутации полупроводнико-вого прибора:

-тока;

-напряжения.

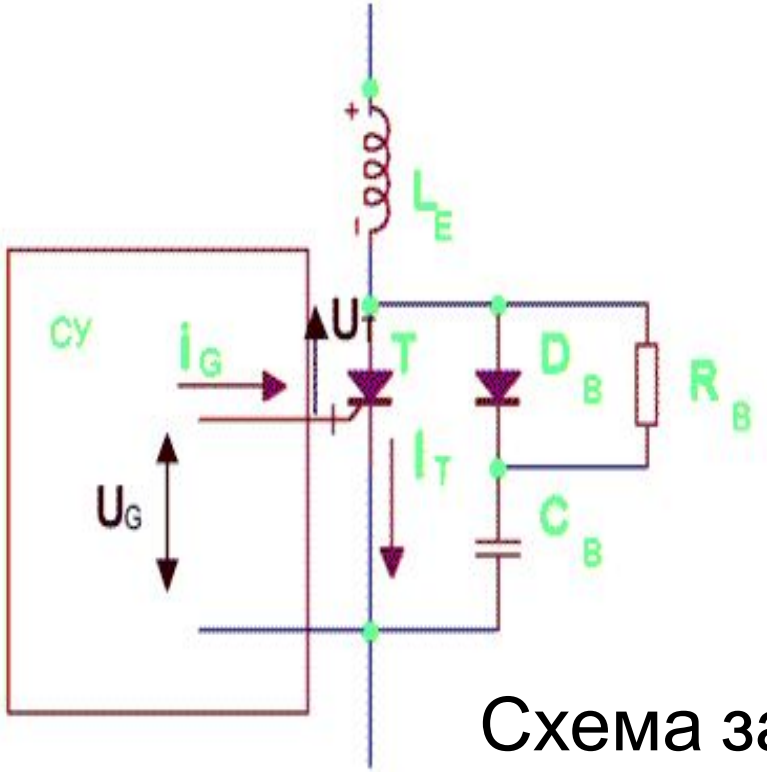


Схема защитной цепи

Дроссель L_E ограничивает скорость нарастания прямого тока dI_T/dt при открывании тиристора.
Конденсатор C_B ограничивают скорость нарастания прямого напряжения dU_T/dt при выключении тиристора.
Диод D_B и резистор R_B обеспечивают разряд и заряд реактивных элементов при коммутации тиристора.

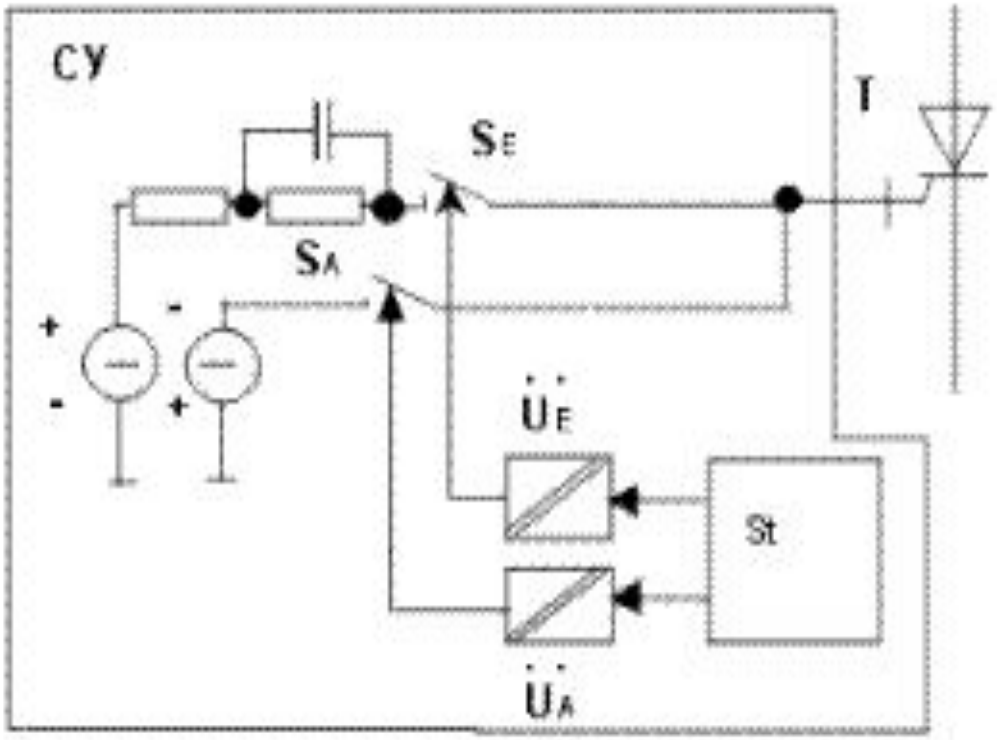
Система управления

Система управления (СУ) содержит следующие функциональные блоки:

-включающий контур, состоящий из схемы формирования отпирающего импульса и источника сигнала для поддержания тиристора в открытом состоянии;

-контур формирования запирающего сигнала;

-контур поддержания тиристора в закрытом состоянии..



Вариант цепи высокопотенциальной системы управления

Тиристоры GCT

В середине 90-х годов фирмами "ABB" и "Mitsubishi" разработан тиристор Gate Commutated Thyristor (GCT).

Это дальнейшее усовершенствование GTO тиристора. Принципиально новая конструкция управляющего электрода, а также заметно отличающиеся процессы, происходящие при выключении прибора.

Основной недостаток GTO заключается в больших потерях энергии в защитных цепях прибора при его коммутации. Поэтому частота коммутации таких тиристоров не превышает 250-300 Гц.

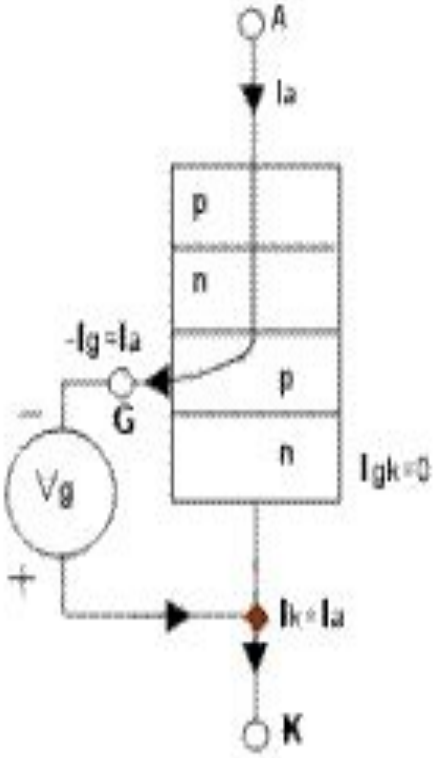
Основная особенность GCT – быстрое выключение.

GCT в фазах включения, проводящего и блокирующего состояния управляется также, как и GTO.

При выключении управление GCT имеет две особенности:

-ток управления Ig равен или превосходит анодный ток Ia (для тиристоров GTO Ig меньше в 3 - 5 раз);

-управляющий электрод обладает низкой индуктивностью, что позволяет достичь скорости нарастания тока управления di_g/dt, равной 3000 А/мкс и более (для тиристоров GTO значение di_g/dt составляет 30-40 А/мкс).



Распределение токов в структуре тиристора GCT

при выключении

Сейчас тиристоры GTO производят несколько крупных фирм Японии и Европы:

-"Toshiba",

-"Hitachi",

-"Mitsubishi",

-"ABB",

-"Eupec".

Параметры приборов по напряжению *до6000 В*; по току (максимальный повторяющийся запираемый ток): до *6000 А.*

Тиристоры GCT выпускают фирмы "Mitsubishi" и "ABB". Приборы рассчитаны на напряжение до *4500 В* и ток до *4000 А*.

Тиристоры

IGCT

Запираемый тиристор GCT с интегрированным блоком управления (драйвером)" (англ. Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)).

Благодаря технологии жёсткого управления равномерное переключение увеличивает область безопасной работы IGCT до пределов, ограниченных лавинным пробоем, т.е. до физических возможностей кремния.

Не требуется никаких защитных цепей от превышения du/dt.

Основной производитель IGCT фирма "ABB".

Параметры тиристоров по напряжению до 6000 В; по току до 4000 А.

ВЫВОДЫ

Появление в последнее время мощных высоковольтных IGBT и MOSFET транзисторов существенно уменьшило использование тиристоров в схемах управления.

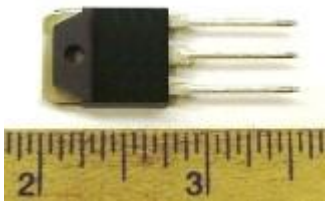
Однако, прибор IGCT сегодня - хорошее решение для применения в области силовой электроники среднего и высокого напряжений.

ТРАНЗИСТОРЫ

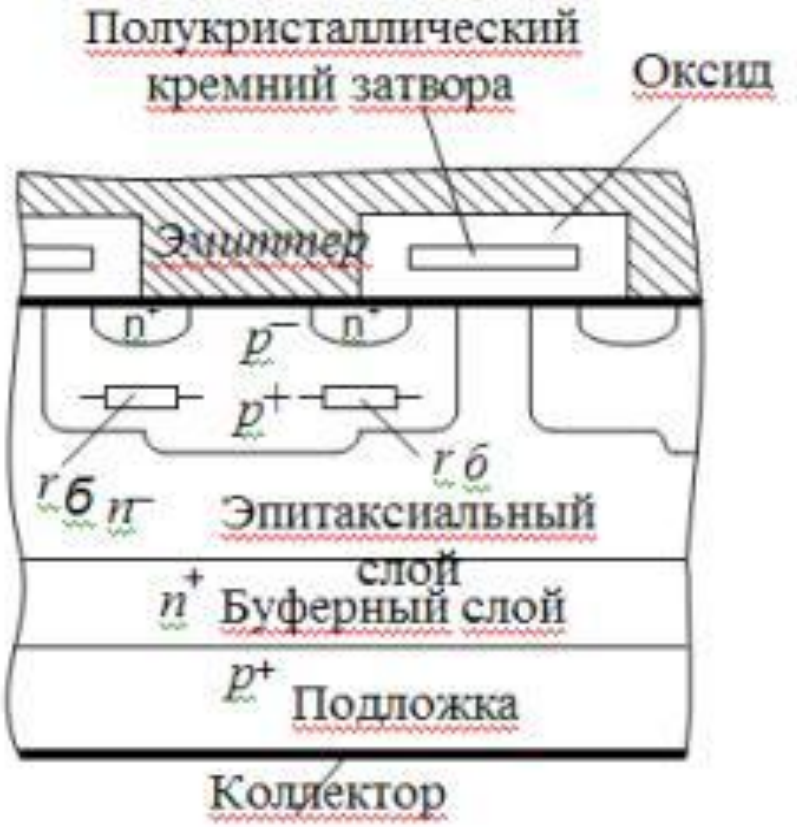
IGBT

(Insulated Gate Bipolar Transistor)

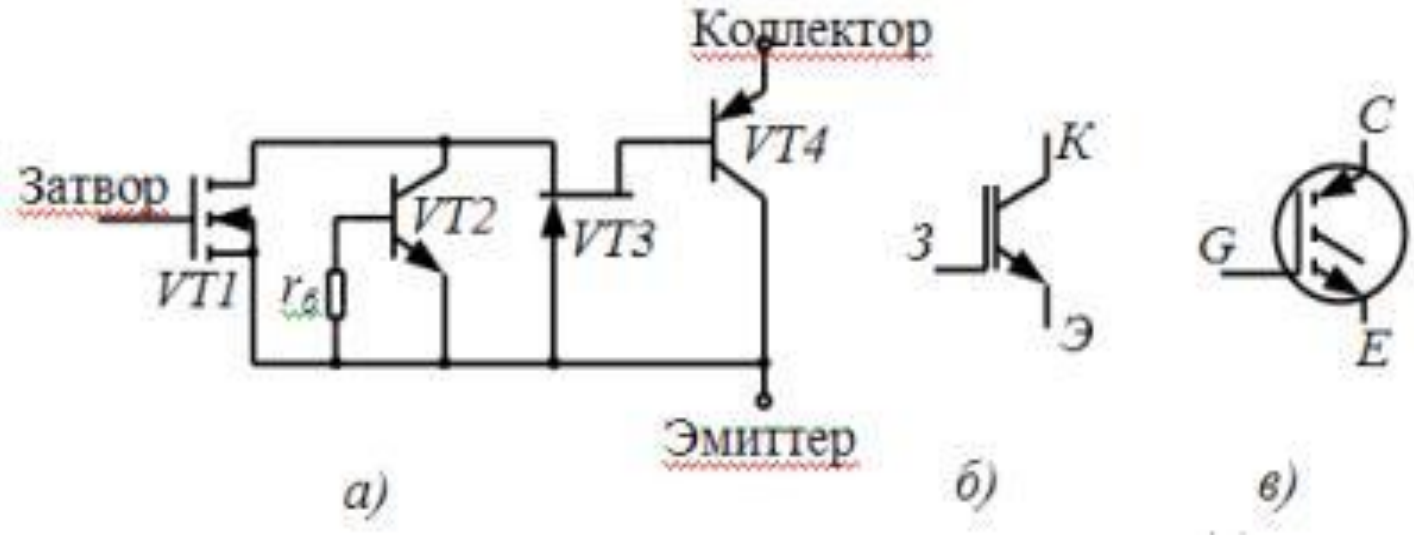
Чаще всего IGBT-транзисторы используют в качестве мощных ключей, у которых время включения 0,2 - 0,4 мкс, а время выключения 0,2 - 1,5 мкс, коммутируемые напряжения достигают 3,5 кВ, а токи 1200 А.



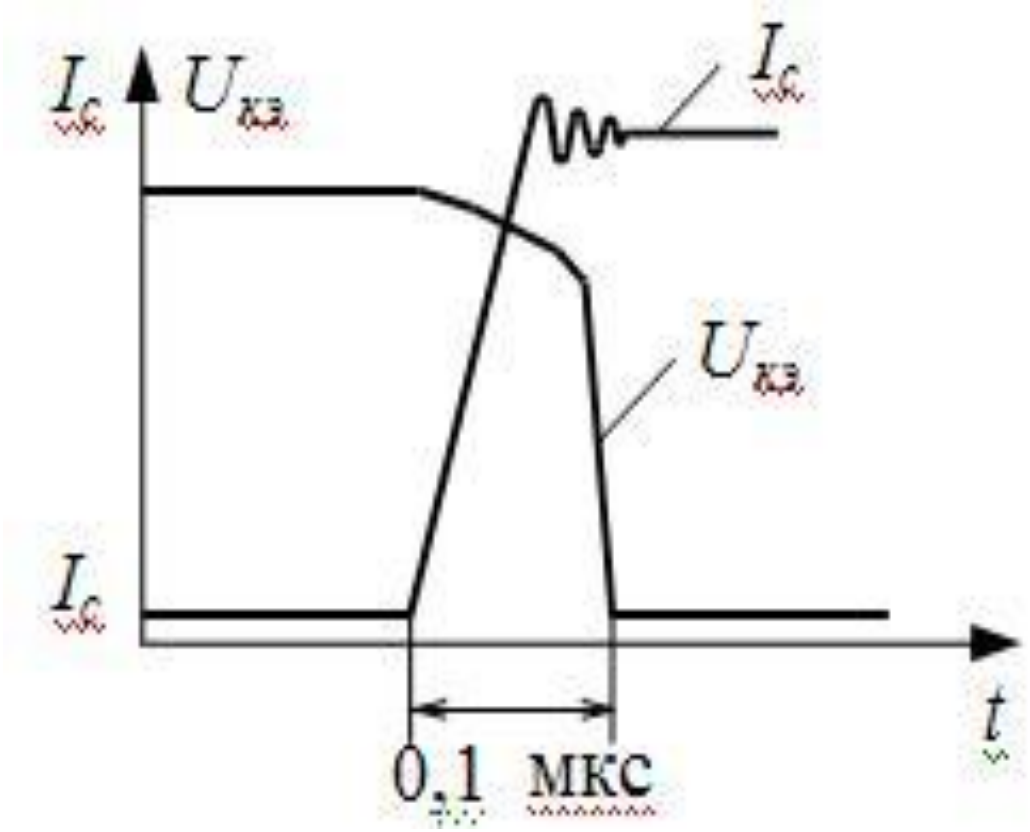
Внешний вид IGBT-транзисторов



Структура IGBT-транзистора



а - эквивалентная схема IGBT-транзистора;
б - условное обозначение в отечественной литературе;
в - условное обозначение в иностранной литературе.



Изменение падения напряжения Uкэ и тока Ic IGBT-транзистора

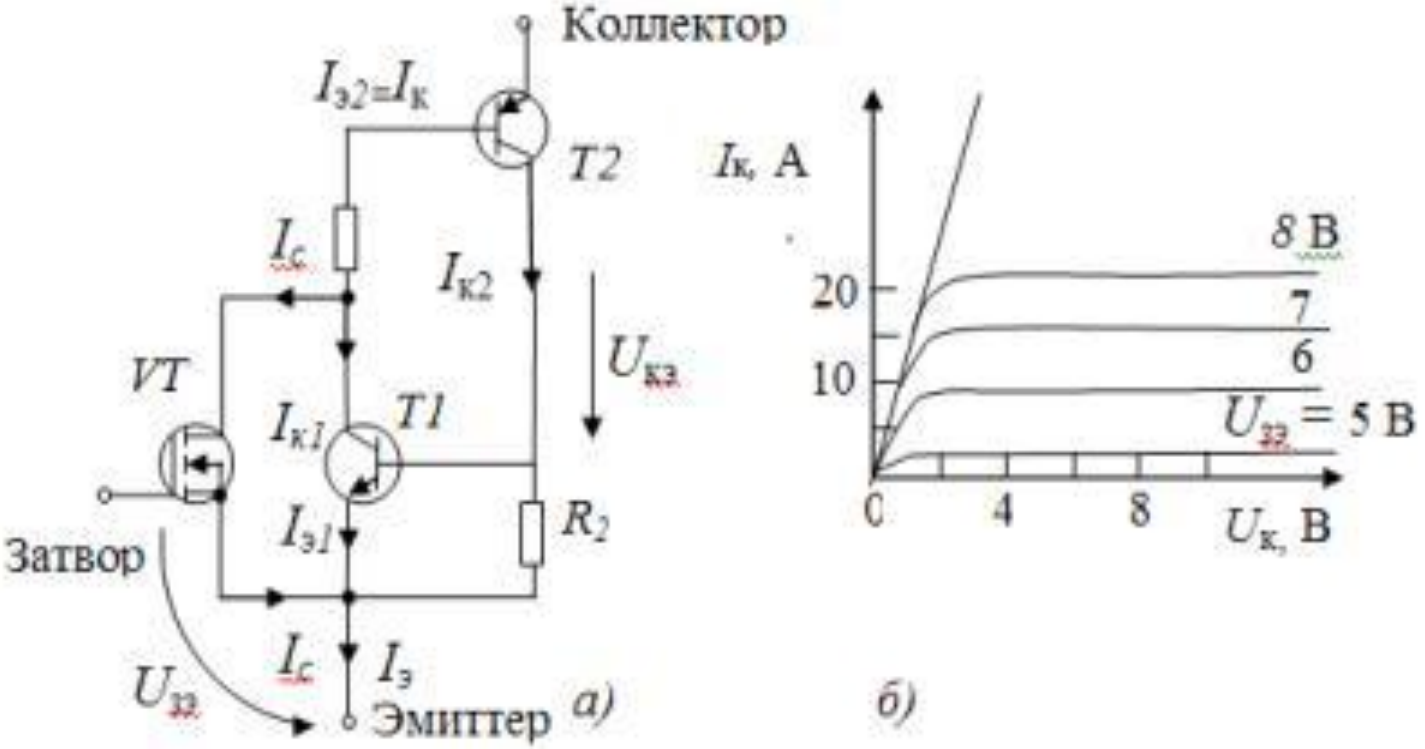
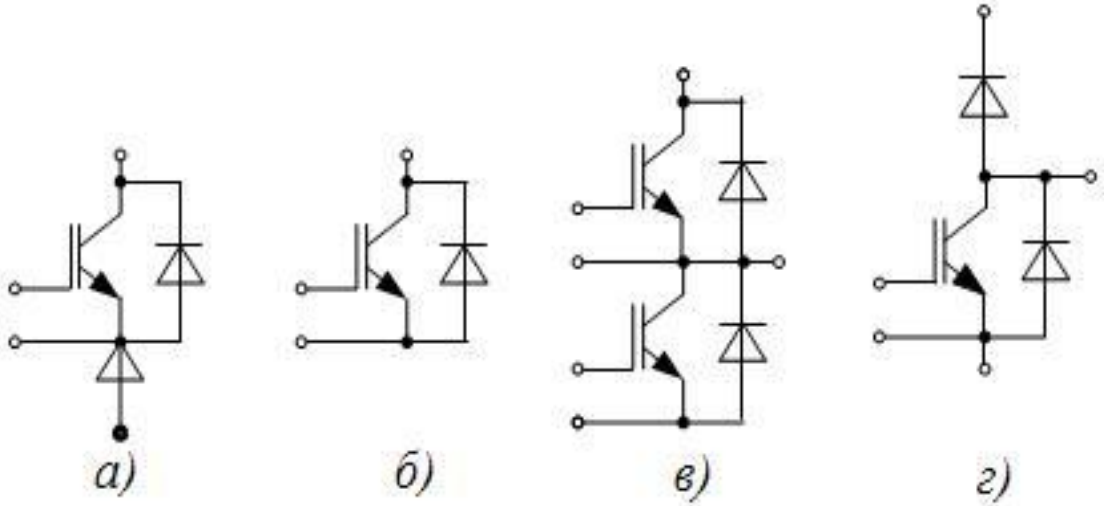


Схема замещения транзистора типа IGBT (а) и его вольт-амперные характеристики (б)

Для большинства транзисторов типа IGBT времена включения и выключения не превышают 0,5 - 1,0 мкс. Для уменьшения количества дополнительных внешних компонентов в состав IGBT-транзисторов вводят диоды или выпускают модули, состоящие из нескольких компонентов

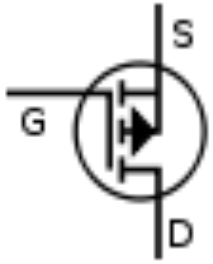


MOSFET транзисторы

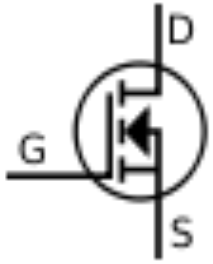
Наиболее распространены транзисторы с индуцированным каналом (англ. *enhancement mode transistor*): у них канал закрыт при нулевом напряжении исток-затвор. Именно их имеют в виду, когда не упоминают тип канала. Гораздо реже встречаются транзисторы со встроенным каналом (англ. *depletion mode transistor*): у них канал открыт при нулевом напряжении исток-затвор.

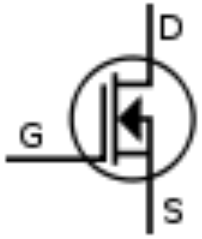
Существует два типа проводимости канала: n-канальные и p-канальные. Тип проводимости определяется типом носителя заряда в канале: электрон либо «дырка».

Условные графические обозначения



P – канал





N - канал

Индуцированный канал Встроенный канал

G (gate) - затвор, S (source) - исток, D (drain) - сток

Особенности подключения

При подключении мощных MOSFET-транзисторов (особенно работающих на высоких частотах на пределе своих возможностей) используется стандартная обвязка транзистора:

1. RC-цепочка (снаббер), включённая параллельно истоку-стоку.
2. Быстрый защитный диод, включённый параллельно истоку-стоку.

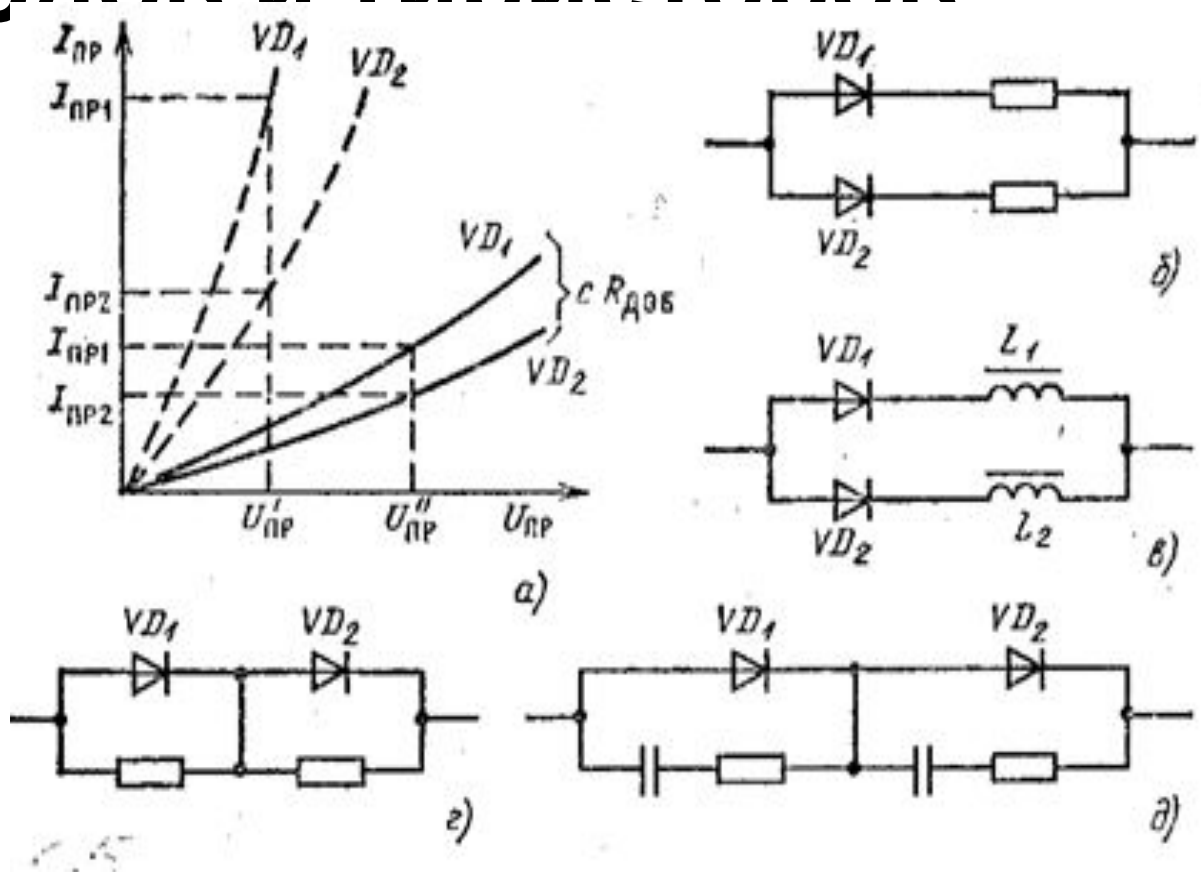
3. Если транзисторы работают в мостовой или полу-мостовой схеме на высокой частоте (сварочные инверторы, индукционные нагреватели, импульсные источники питания), то помимо защитного диода в цепь стока встречно включается диод Шоттки для блокирова-ния паразитного диода.

4. Резистор, включённый между истоком и затвором, для сброса заряда с затвора.

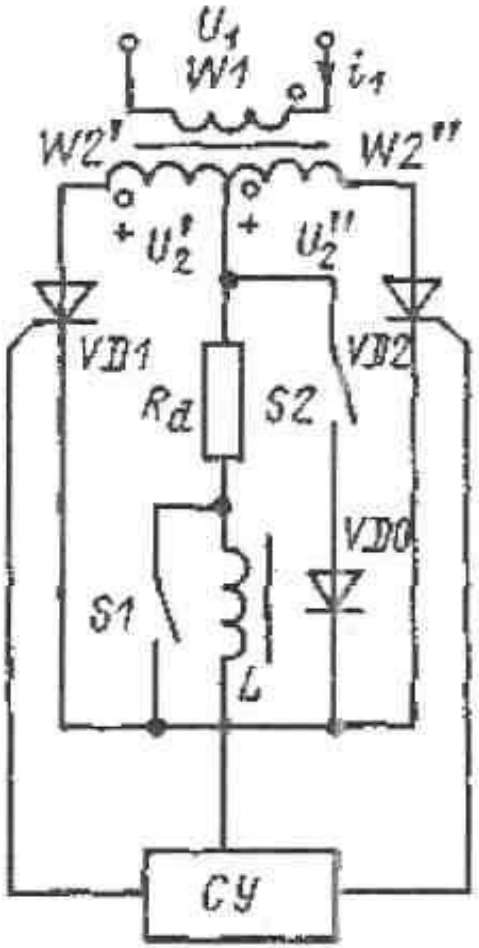
5. Резистор, включённый в цепь затвора, для уменьше-ния тока заряда затвора.

6. Управление мощным MOSFET-транзистором, работающем в ключевом режиме на высоких частотах осуществляют с помощью драйвера.

Последовательное и параллельное включение диодов и тиристоров



Однофазный управляемый выпрямитель с выводом от средней точки вторичной обмотки трансфо



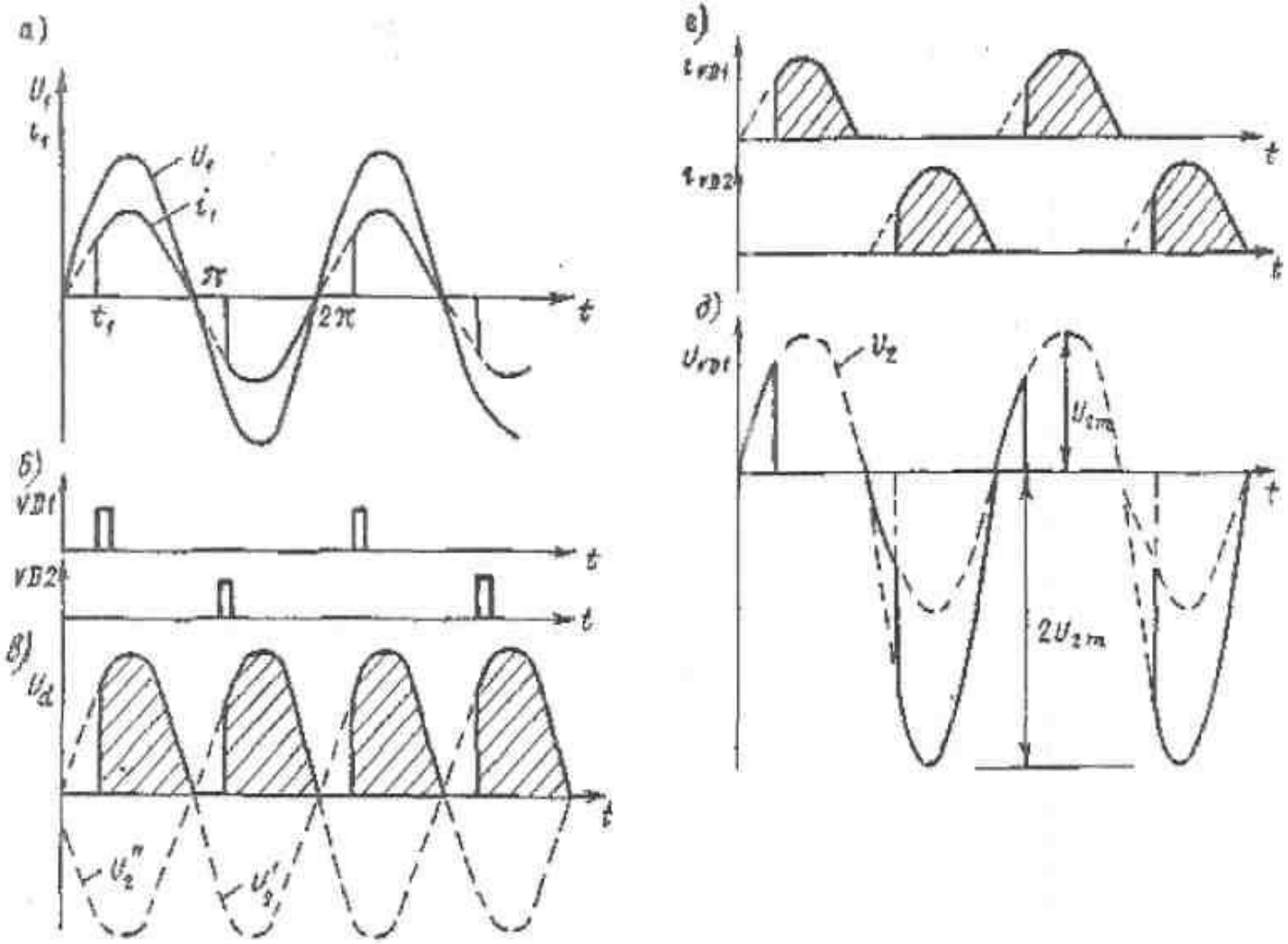


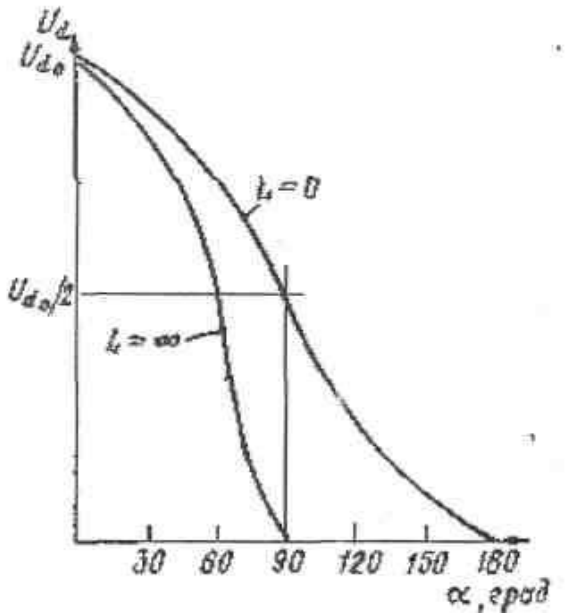
Диаграмма работы однофазного нулевого управляемого выпрямителя на активную нагрузку

U_d=0.9 U_2.напряжение на выходе преобразователя

при угле управлени $\alpha = 0$

$$U_d = U_{d0} \approx \frac{1+\cos\alpha}{2},$$

регулировочная характеристика выпрямителя при работе на активную нагрузку



регулировочная характеристика однофазного УВ при работе на активную и индуктивную нагрузку

Максимальное прямое напряжение на тиристоре

$$U_{2max} = \sqrt{2}U_2.$$

Максимальное обратное напряжение на тиристоре

$$U_{обр.max} = 2\sqrt{2}U_2.$$

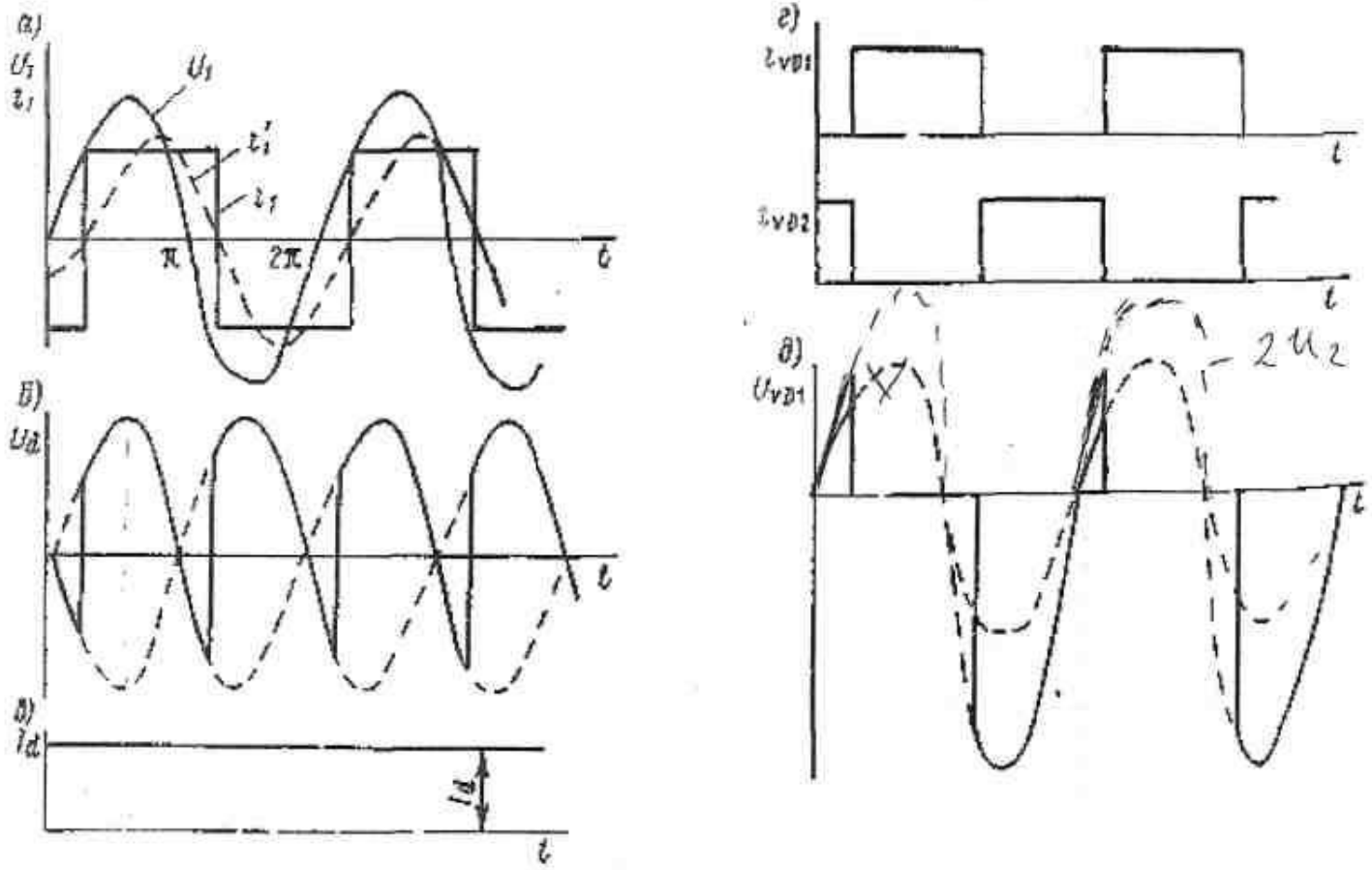


Диаграмма работы однофазного нулевого УВ на индуктивную нагрузку

Регулировочная характеристика УВ описывается выражением

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \upsilon \cdot d\upsilon$$

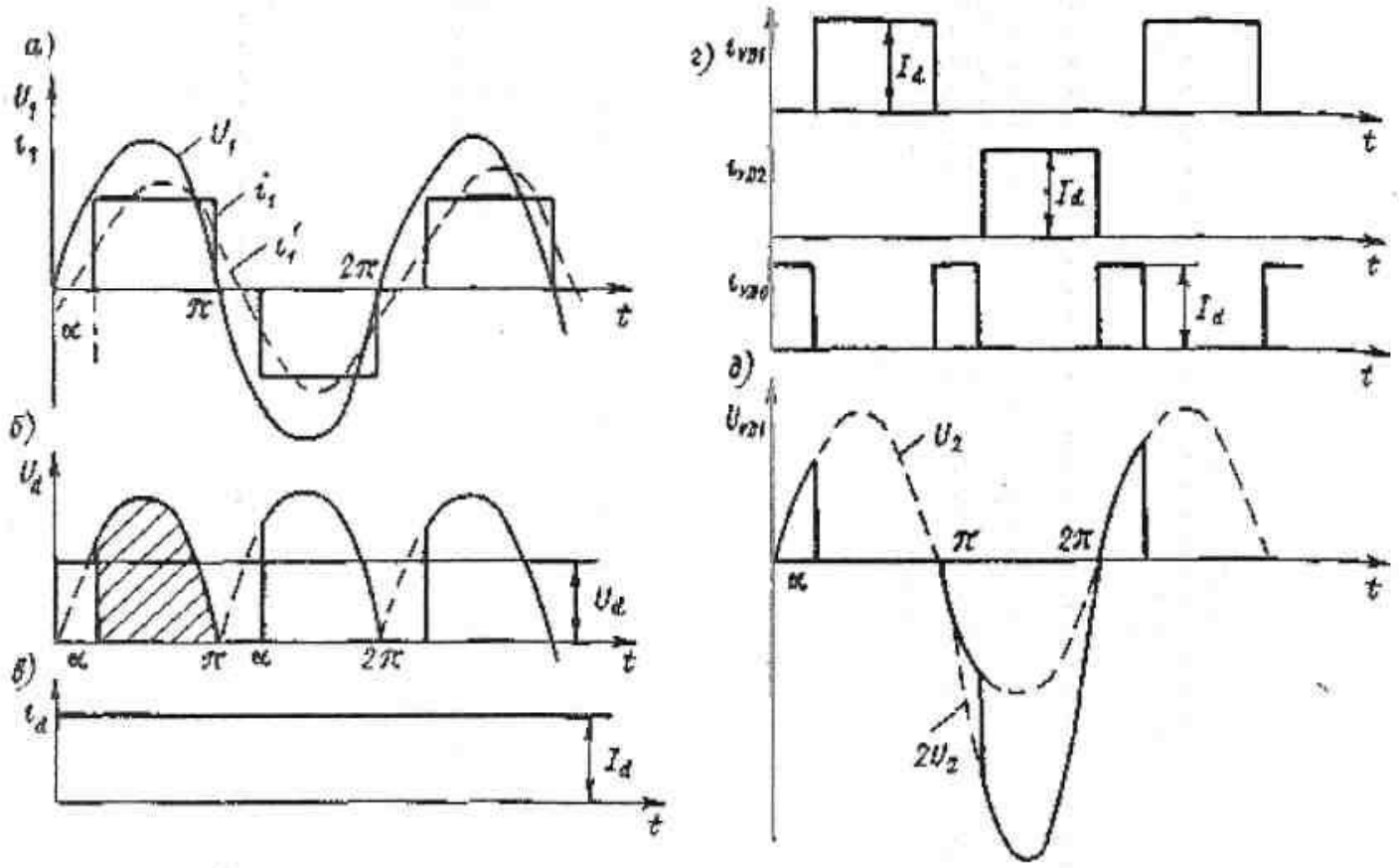
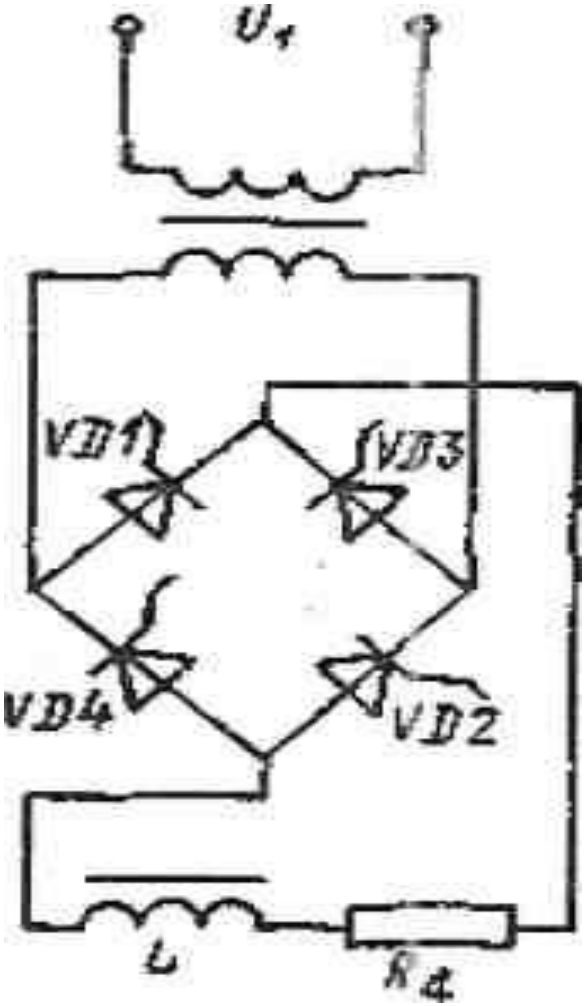


Диаграмма работы однофазного УВ с нулевым диодом

$$U_d = U_{d0} \frac{1+\cos\alpha}{2}.$$ регулировочная характеристика УВ с нулевым диодом

Однофазный мостовой управляемый выпрямитель



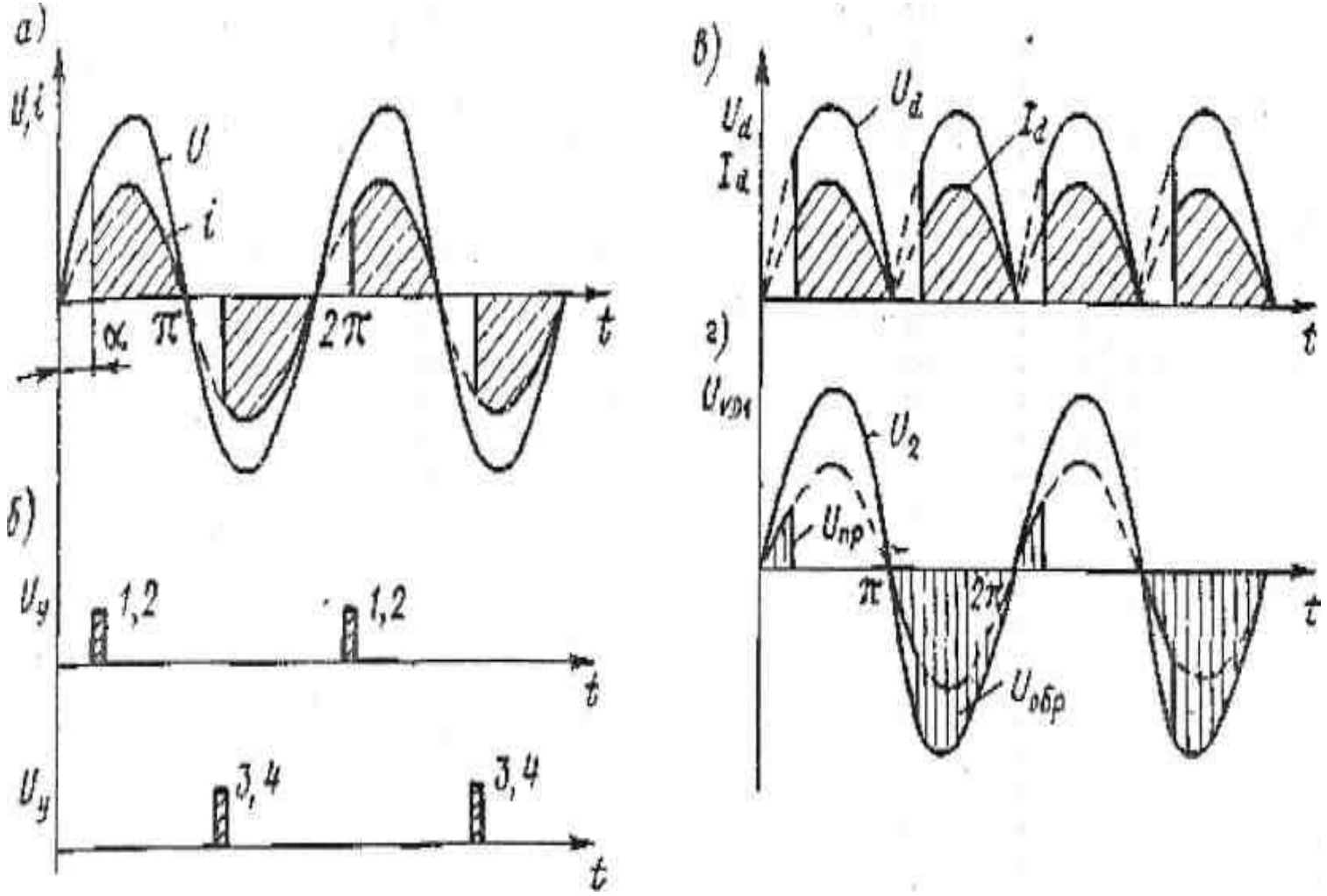


Диаграмма работы однофазного мостового УВ на активную нагрузку

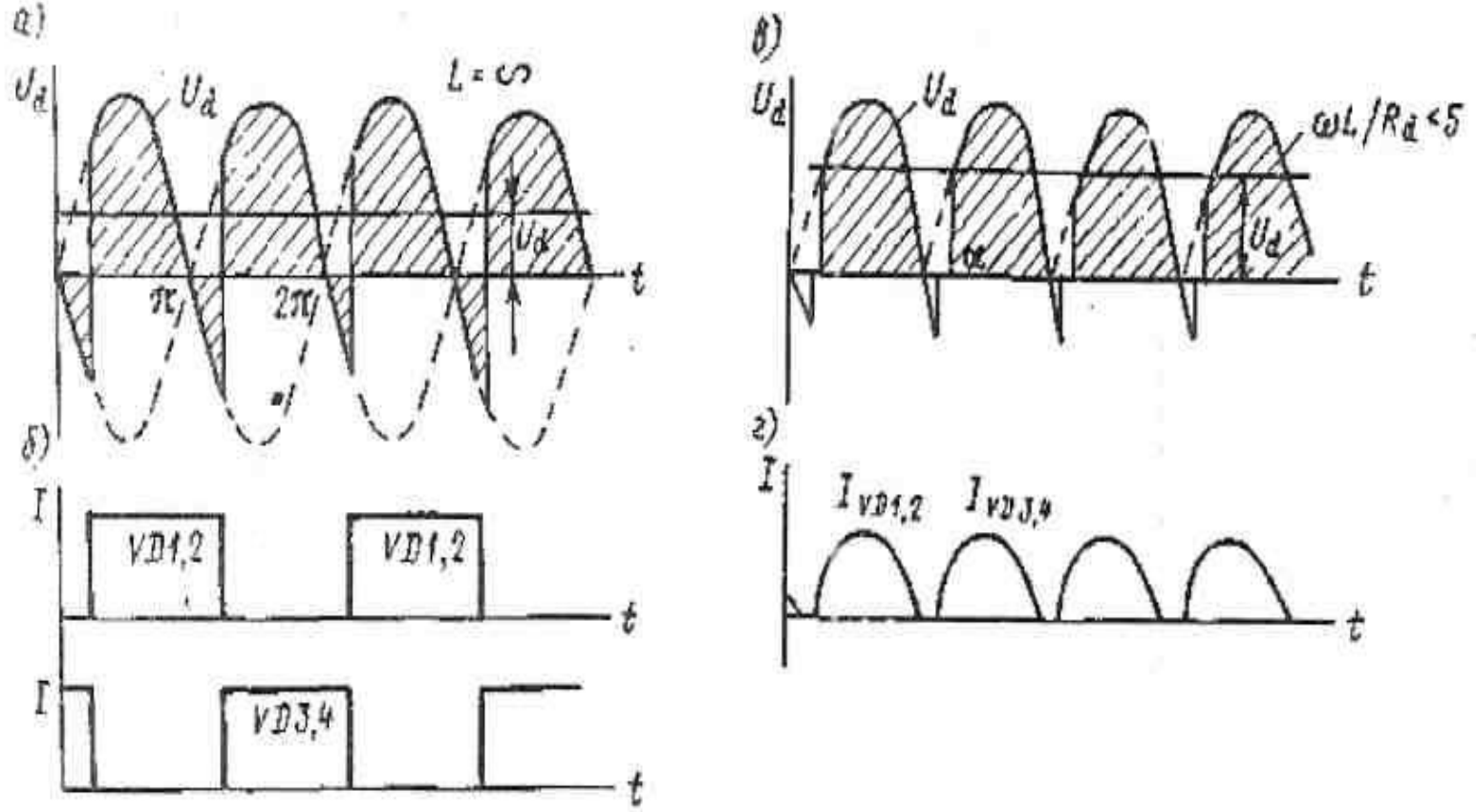
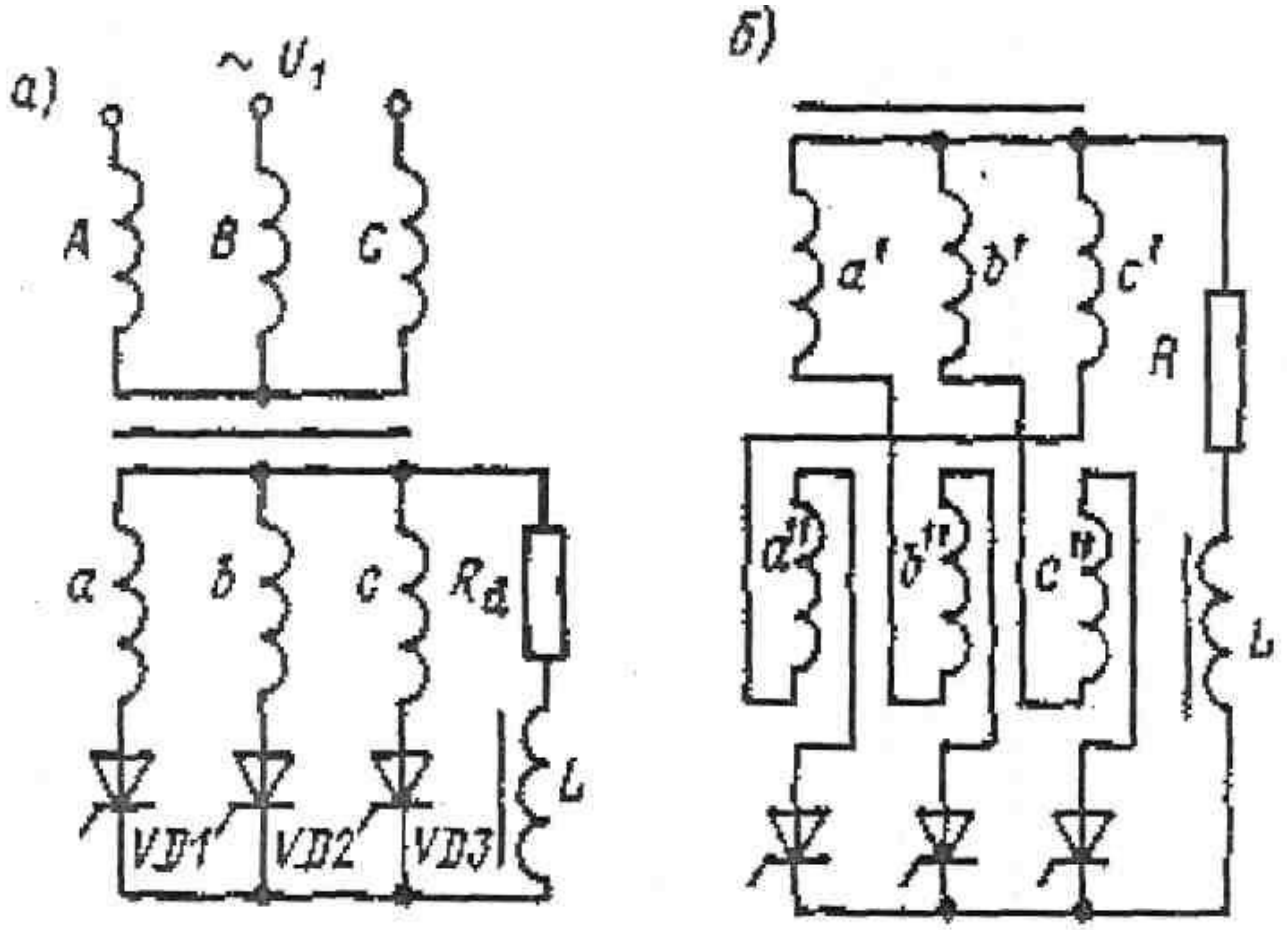
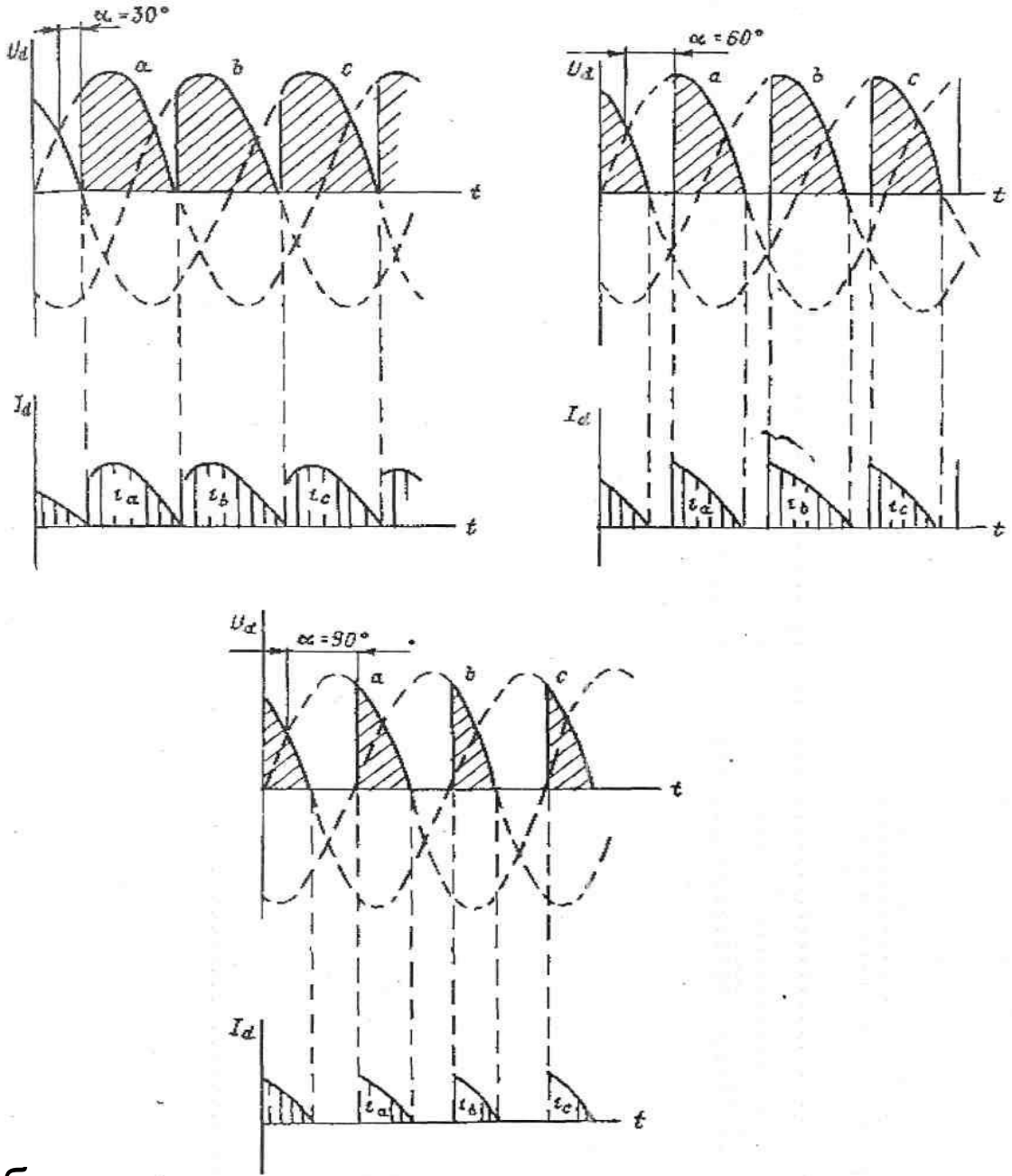


Диаграмма работы однофазного мостового УВ на индуктивную нагрузку

ТРЕХФАЗНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ВЫВОДОМ ОТ СРЕДНЕЙ ТОЧКИ ТРАНСФОРМАТОРА



Трехфазный УВ с выводом от средней точки трансформатора (а)
и с соединением обмоток в зигзаг (б)



Диаграммы работы на активную нагрузку при различных углах регулирования

Критическая точка $\alpha = 30°$.

При изменении α от 0 до 30°

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha,$$

где $U_{d0} = 1.17 \cdot U_{2\phi}$.

При $\alpha > 30°$

$$U_d = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \cdot \left[1 + \cos(30° + \alpha)\right],$$

Предельный угол регулирования на активную нагрузку составляет 150 °.

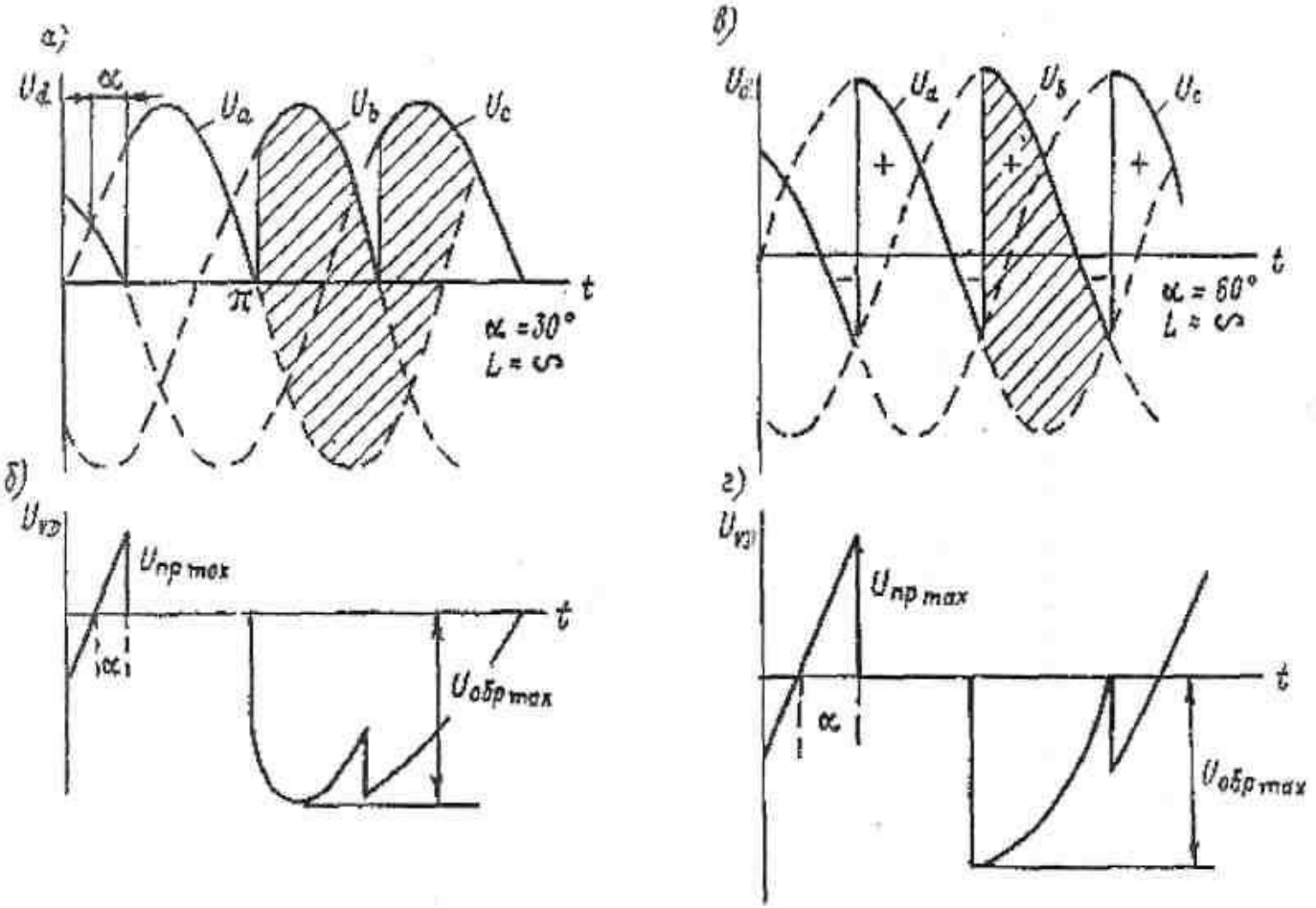
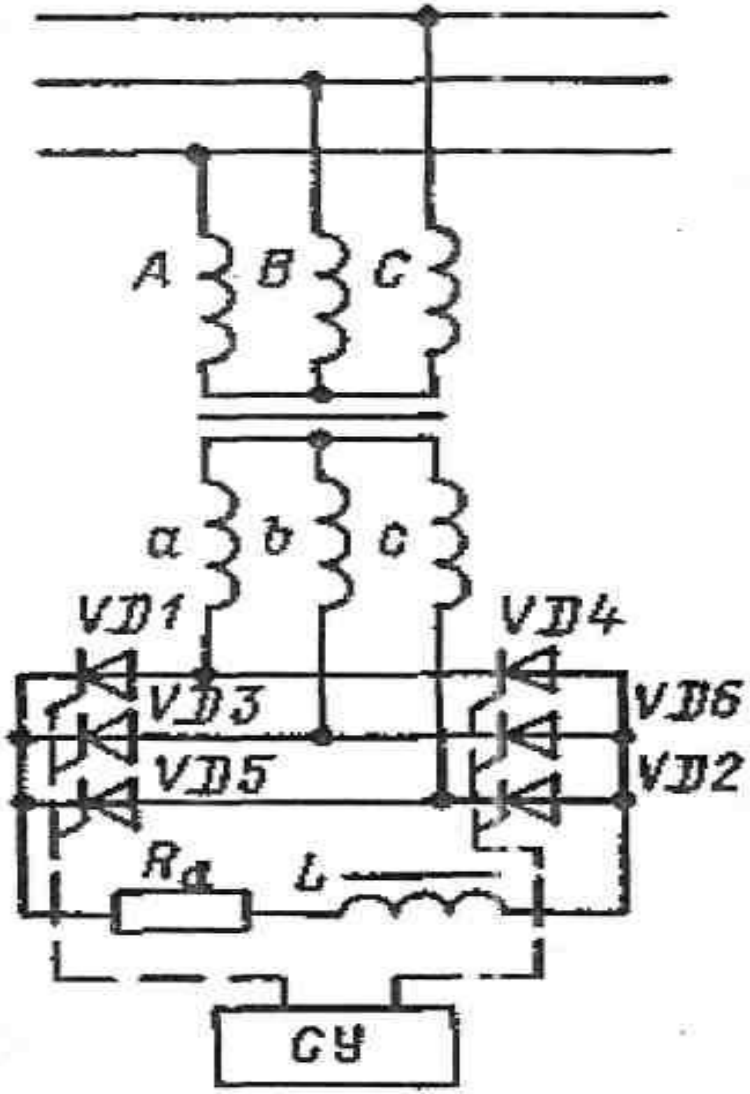
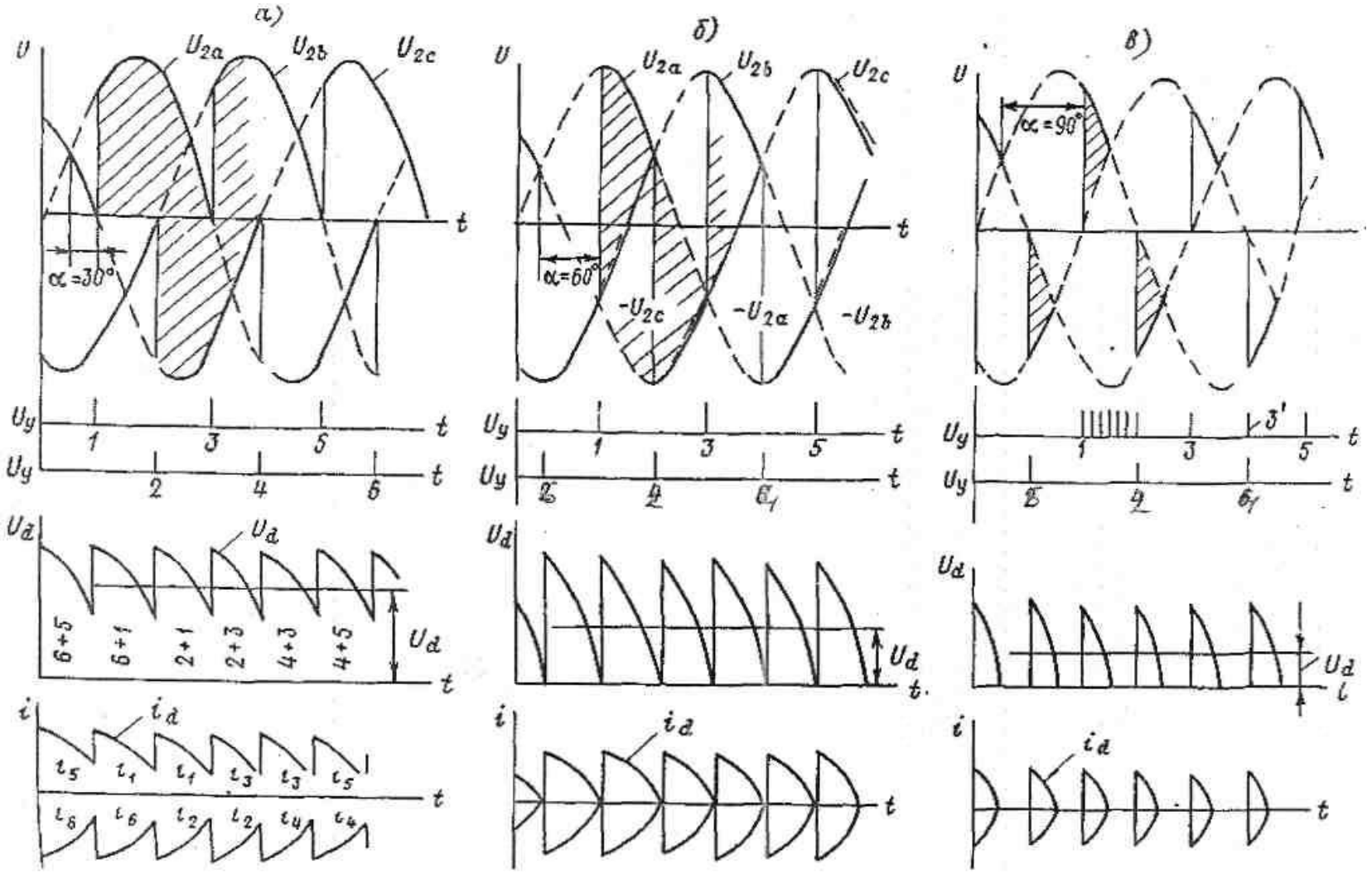


Диаграмма работы трехфазного нулевого УВ на индуктивную нагрузку

ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПЬ





Диаграммы работы трехфазного мостового УВ на активную нагрузку при различных углах регулирования

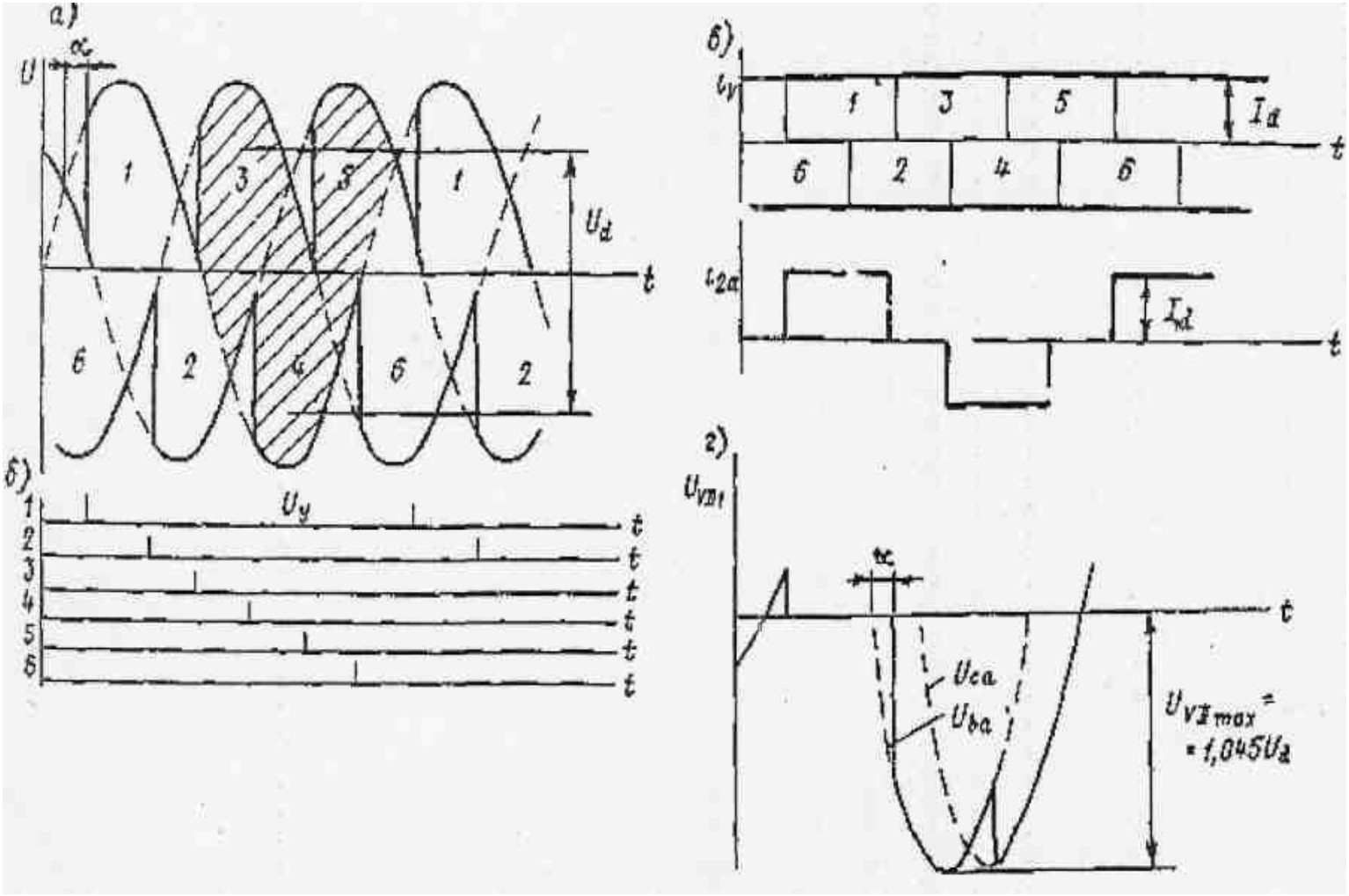
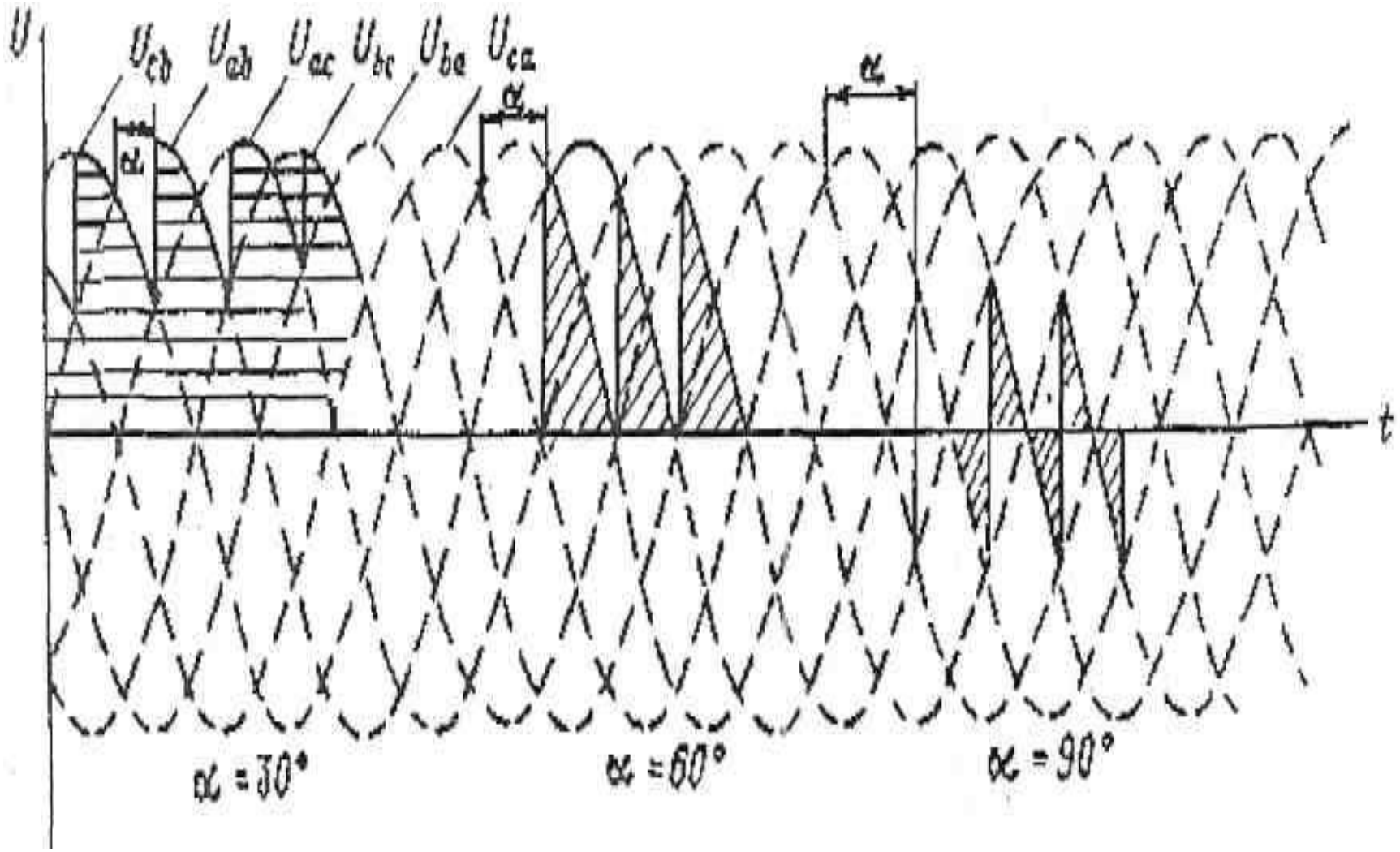
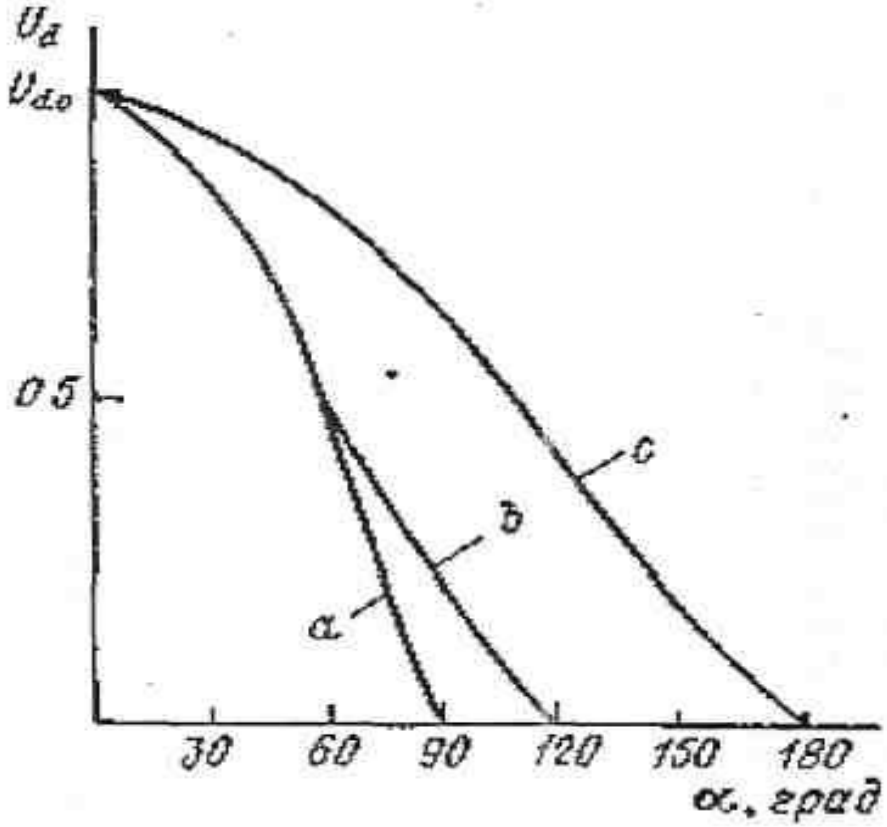


Диаграмма работы трехфазного мостового УВ на индуктивную нагрузку

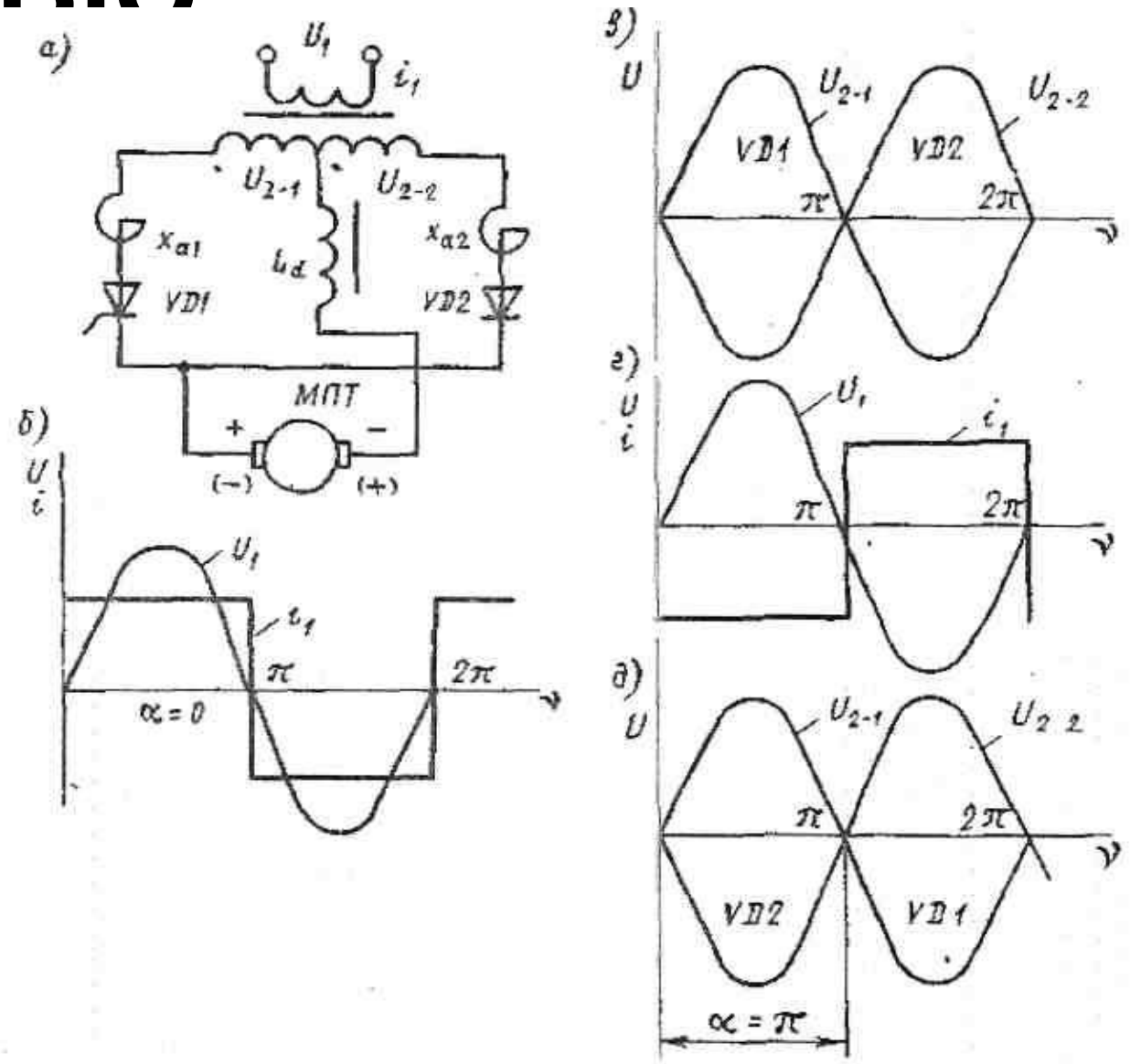


Диаграммы работы трехфазного мостового УВ при различных углах регулирования



Регулировочные характеристики трехфазного УВ

ИНВЕРТОРЫ, ВЕДОМЫЕ СЕТЬЮ



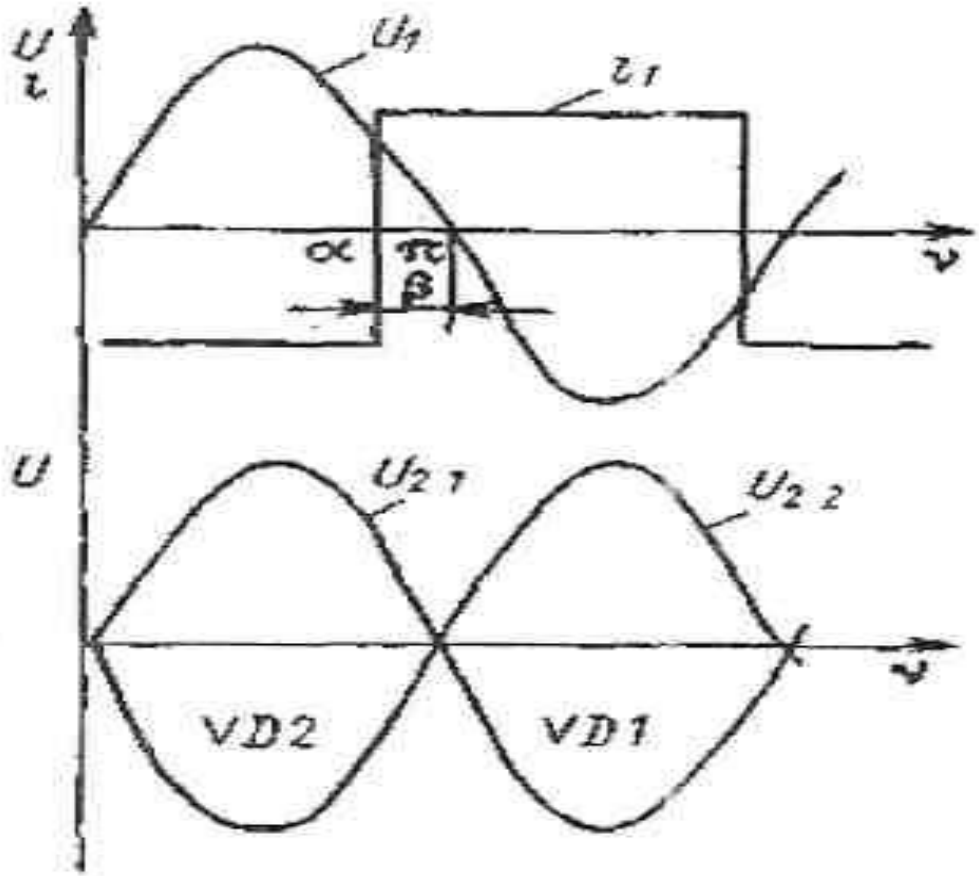


Диаграмма работы тиристора в ИВС

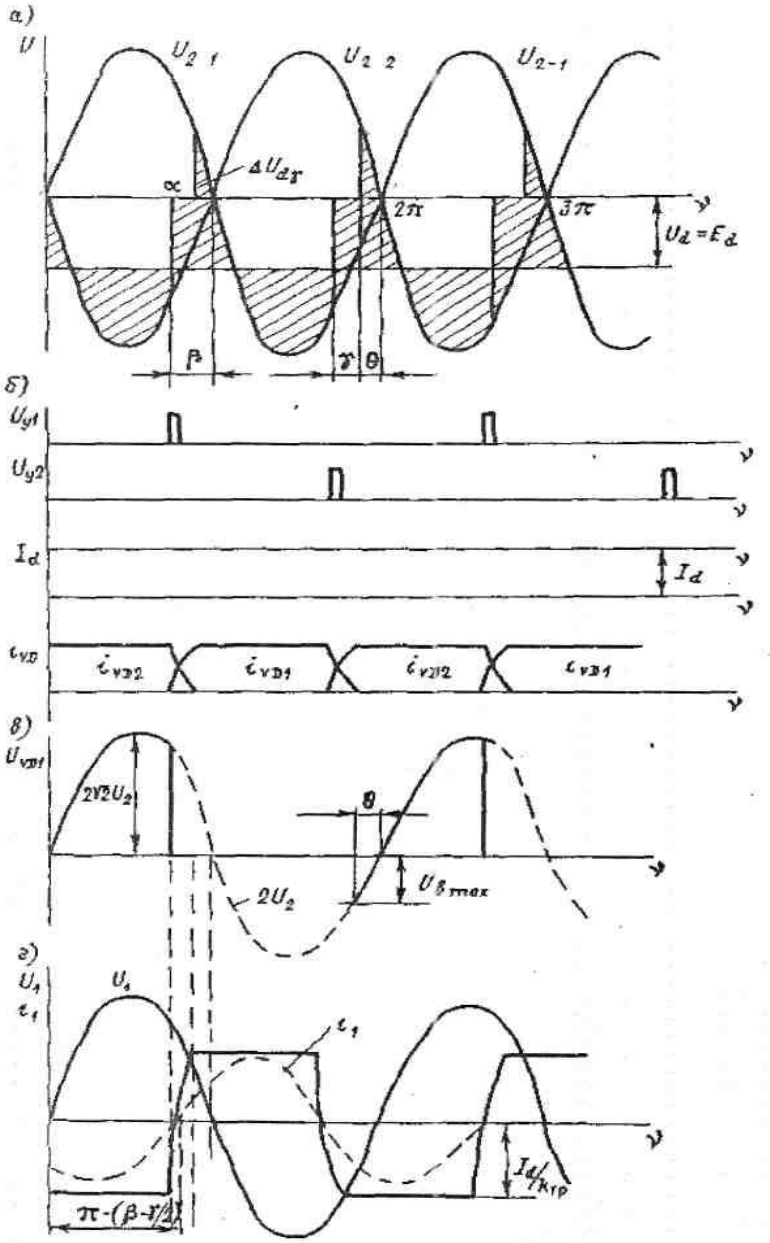
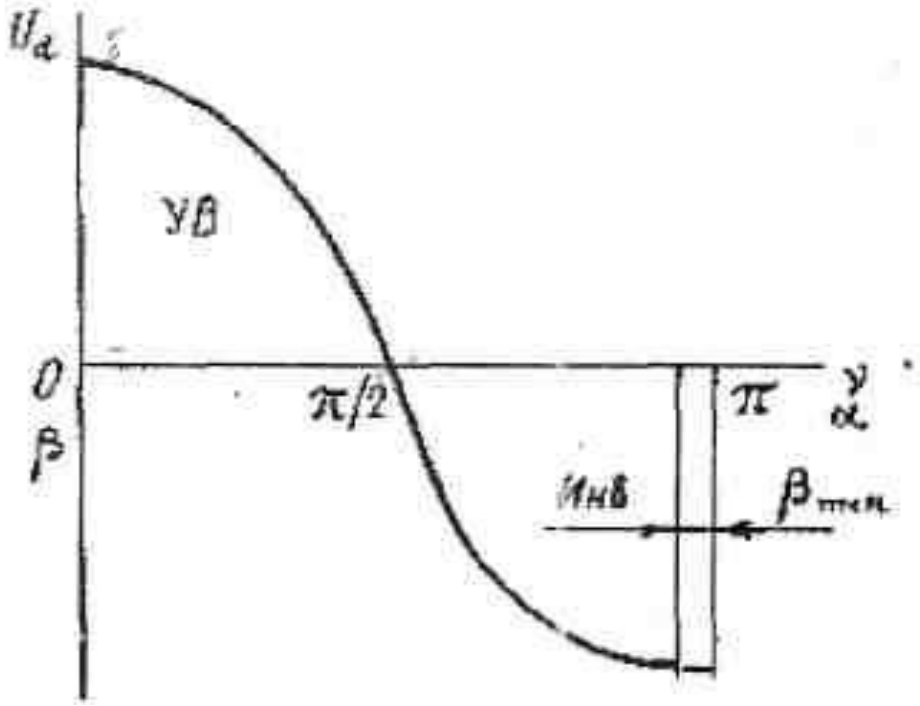
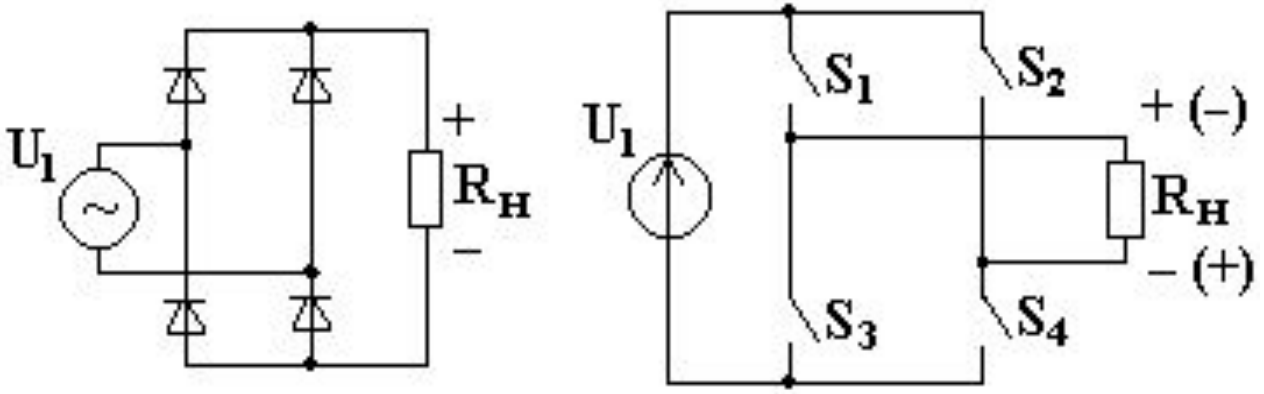


Диаграмма работы однофазного ИВС



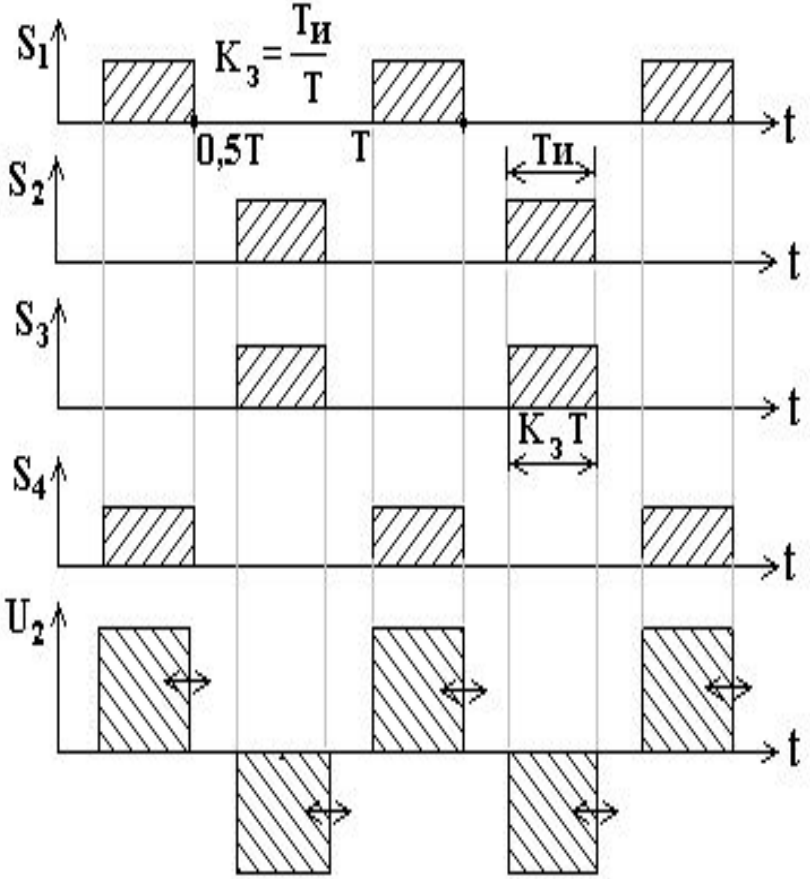
Обобщенная характеристика тиристорного преобразователя

Инверторы напряжения

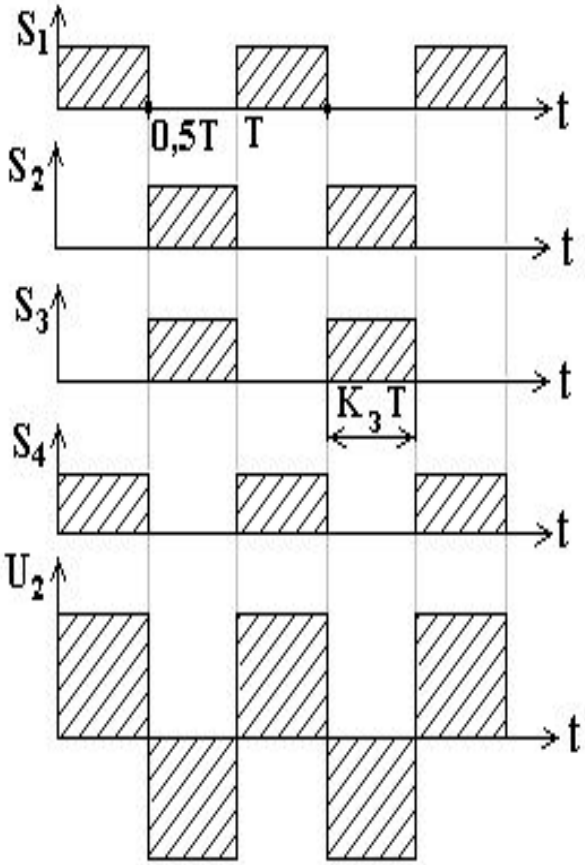


Инвертор -устройство, противоположное выпрямителю

Регулируемый инвертор

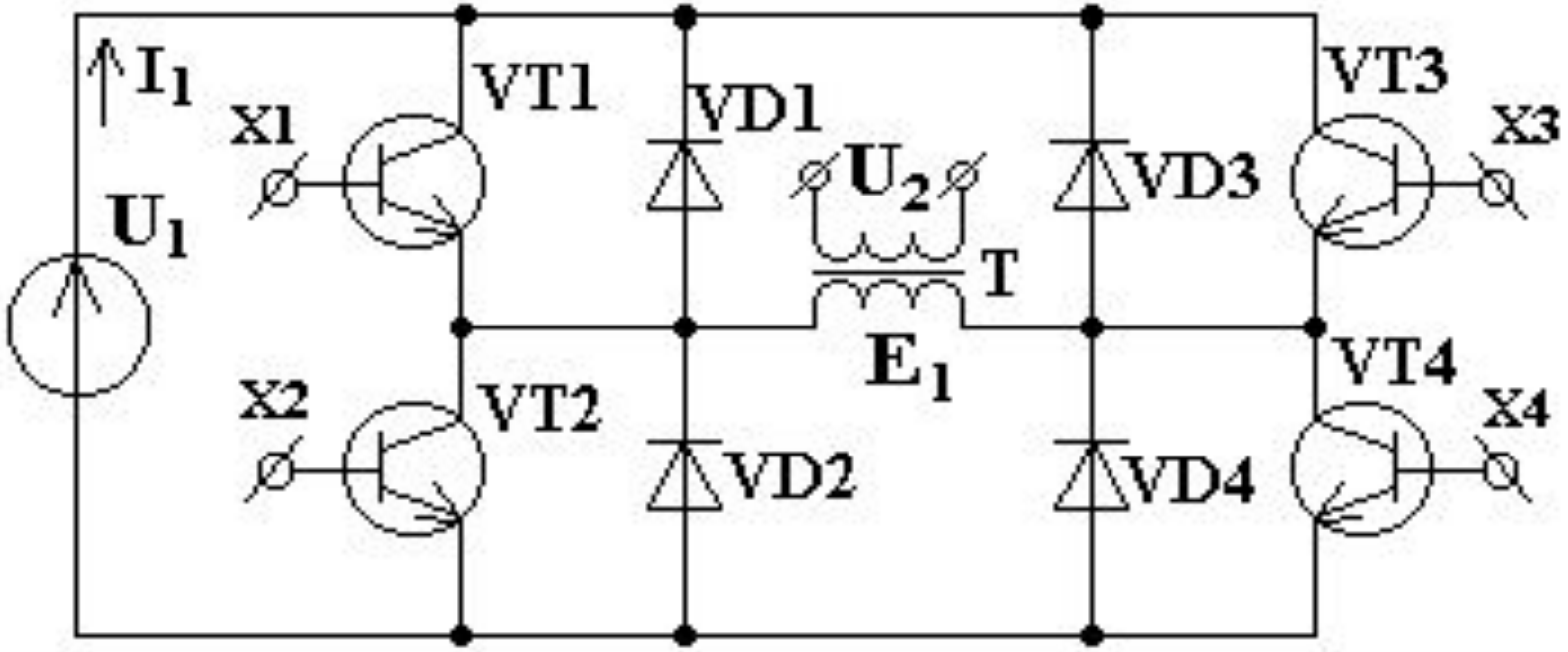


Нерегулируемый инвертор



Транзисторные ИНВЕРТОРЫ напряжения

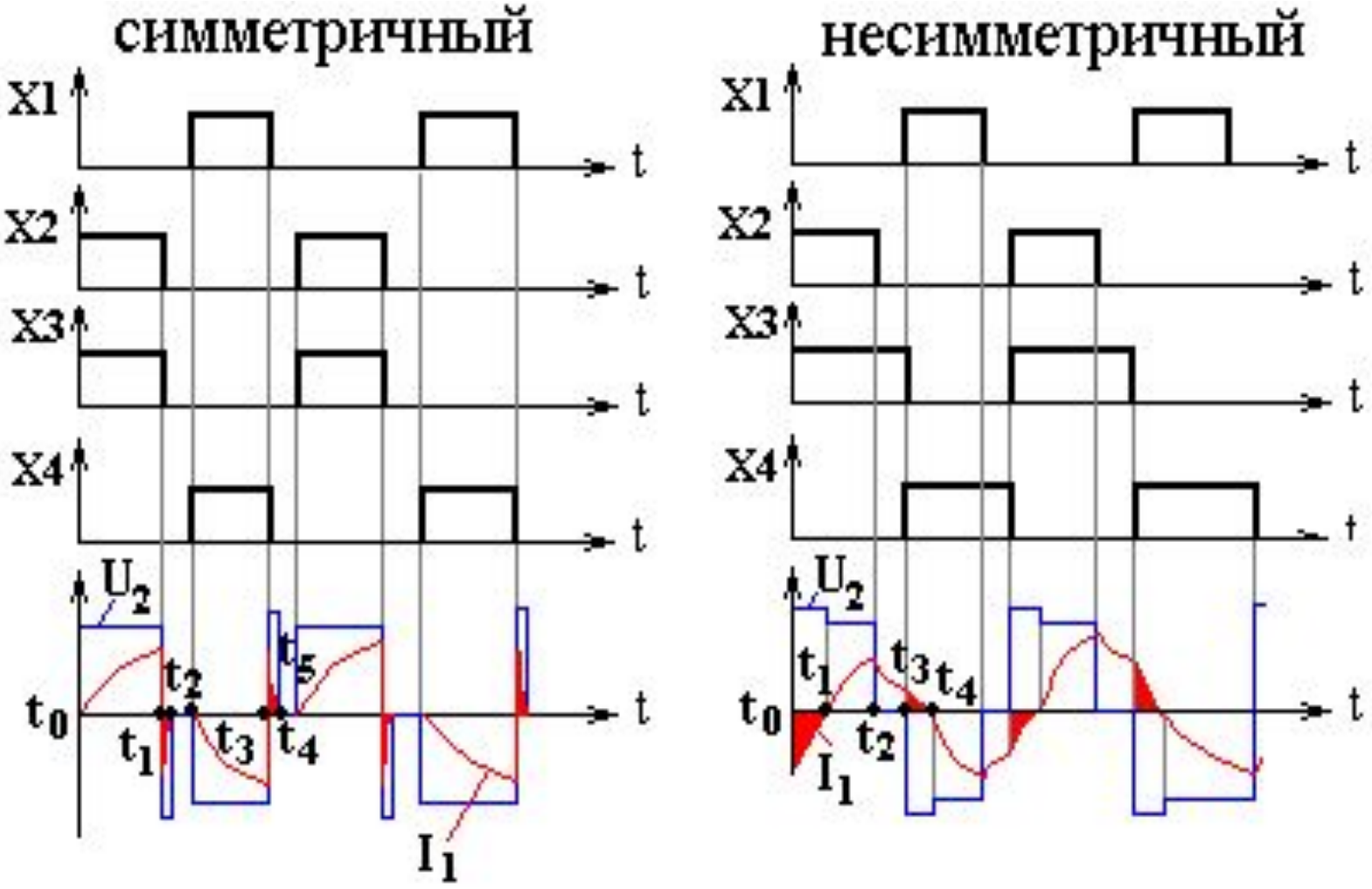
с внешним управлением



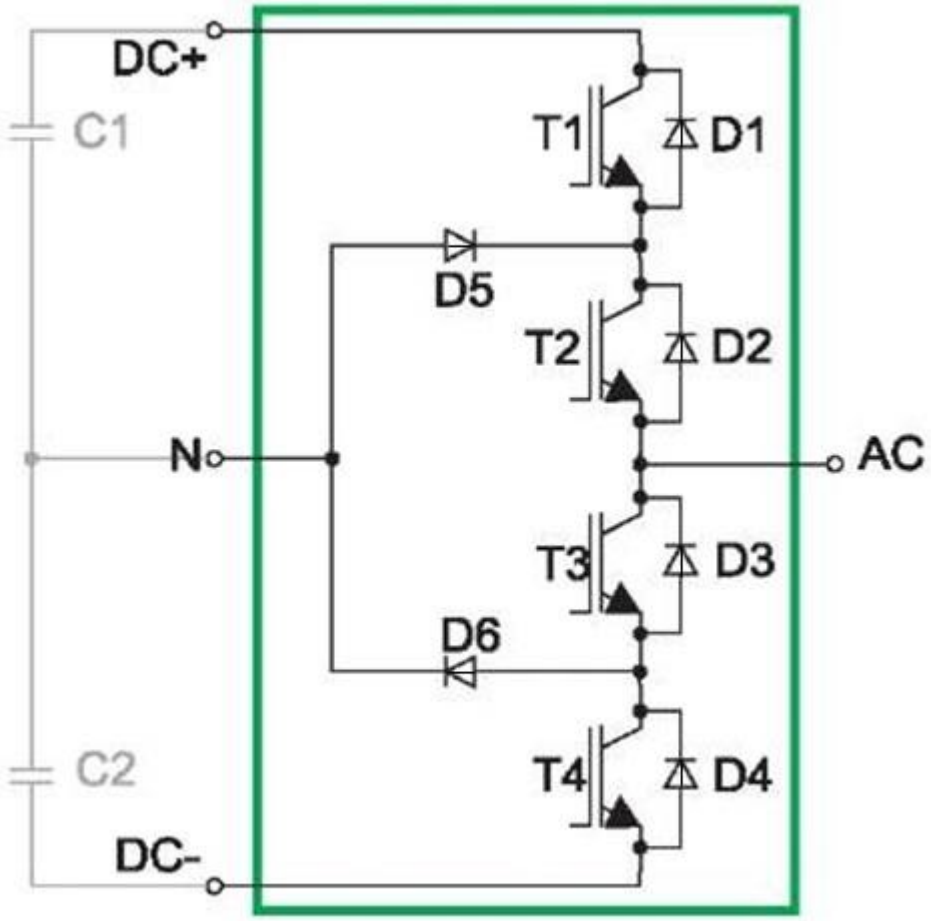
Двухтактный транзисторный инвертор напряжения

Мостовая схема инвертора напряжения

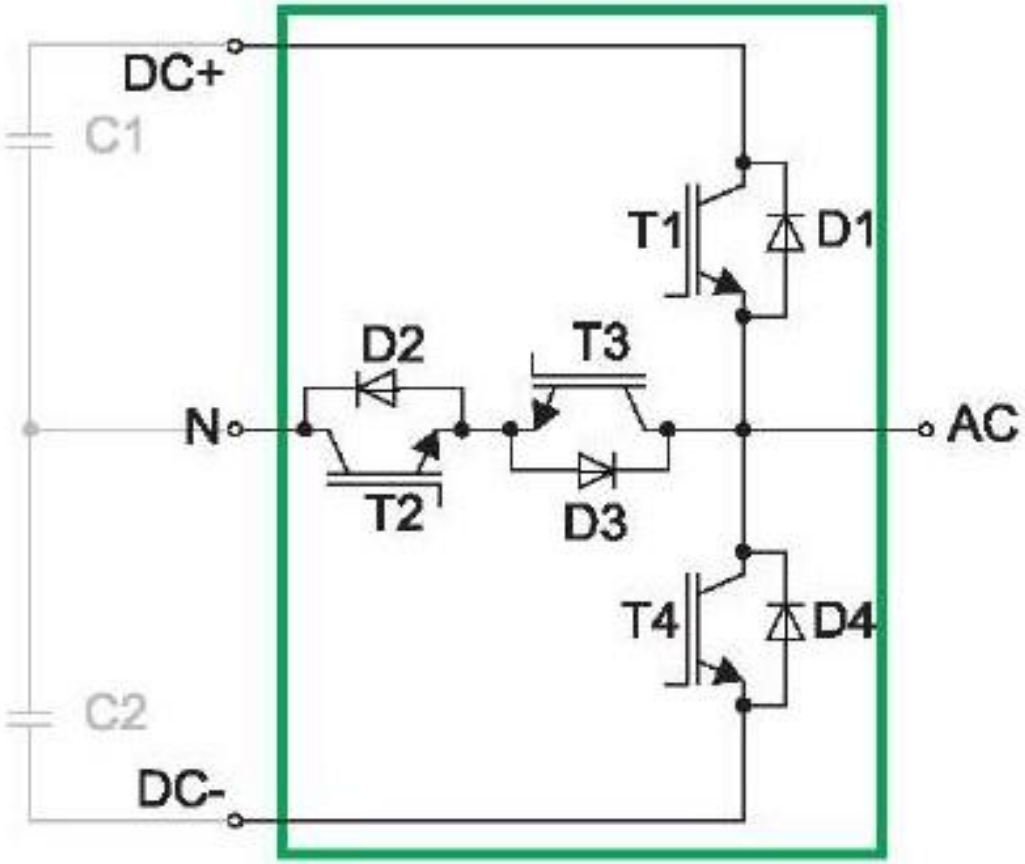
Два алгоритма управления ключевыми элементами инвертора напряжения



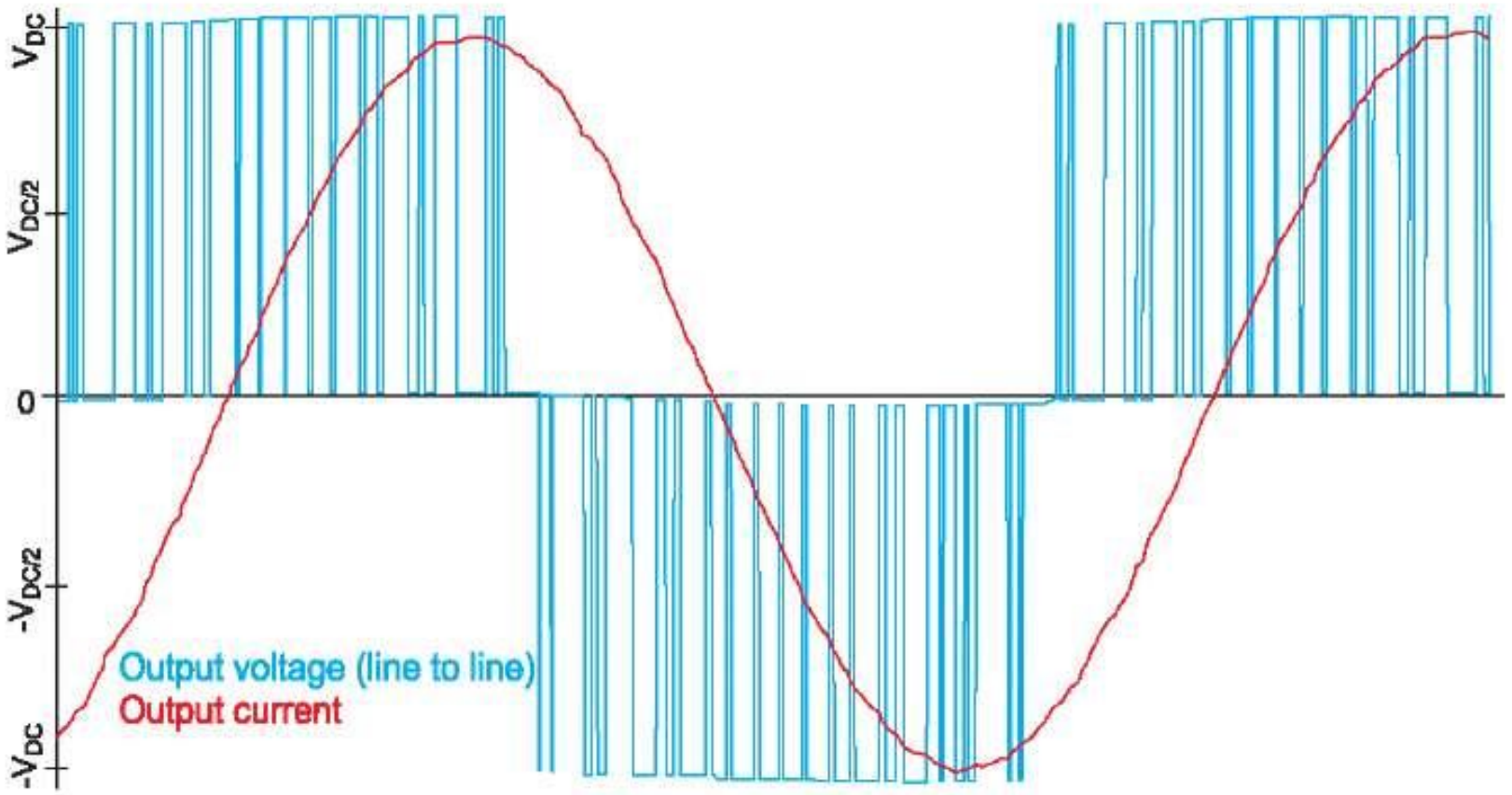
Трехуровневый инвертор со связью со средней точкой через диоды



Трехуровневый инвертор с Т-образным мостом



Осциллограмма напряжений двухуровневого инвертора



Осциллограмма напряжений трехуровневого инвертора

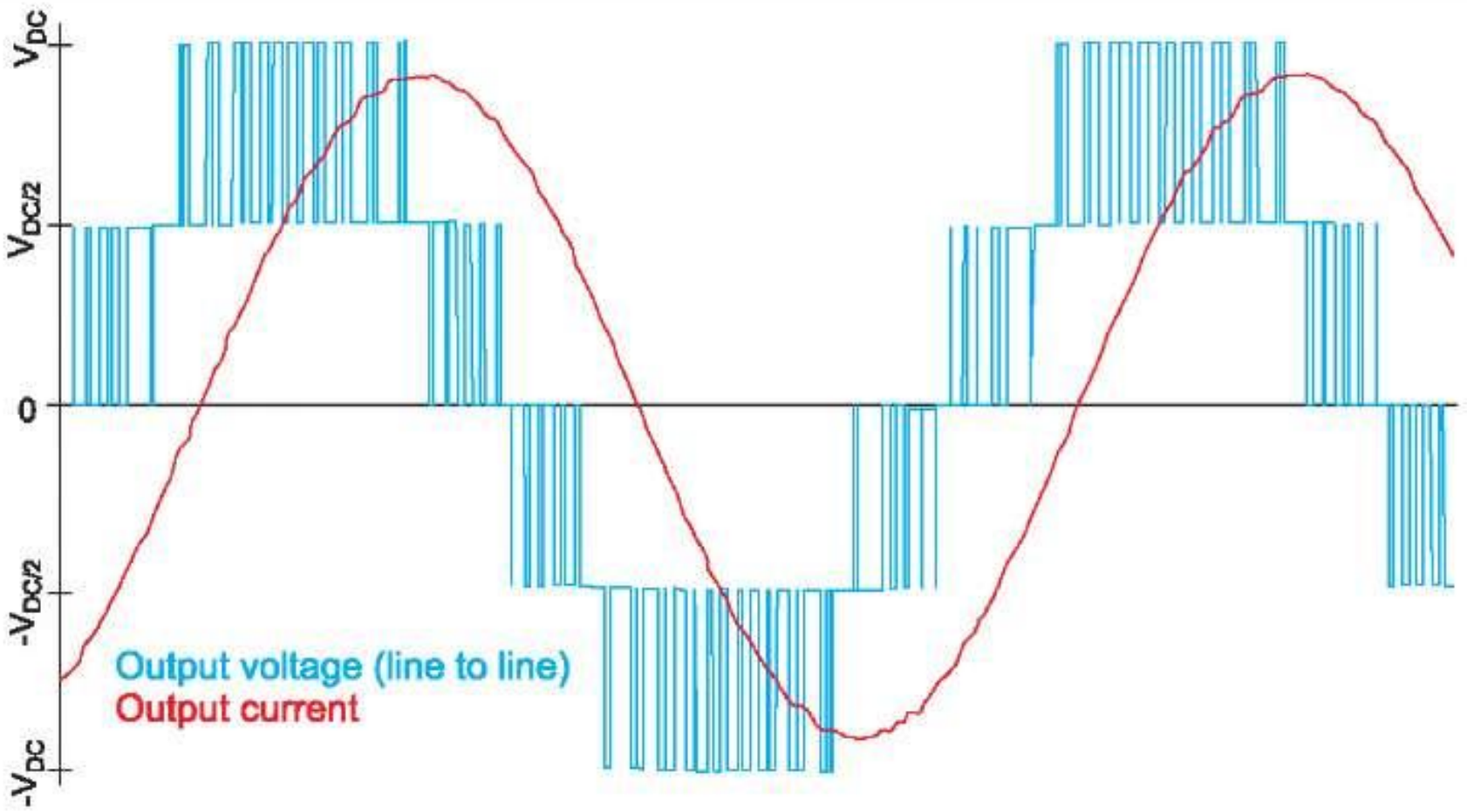
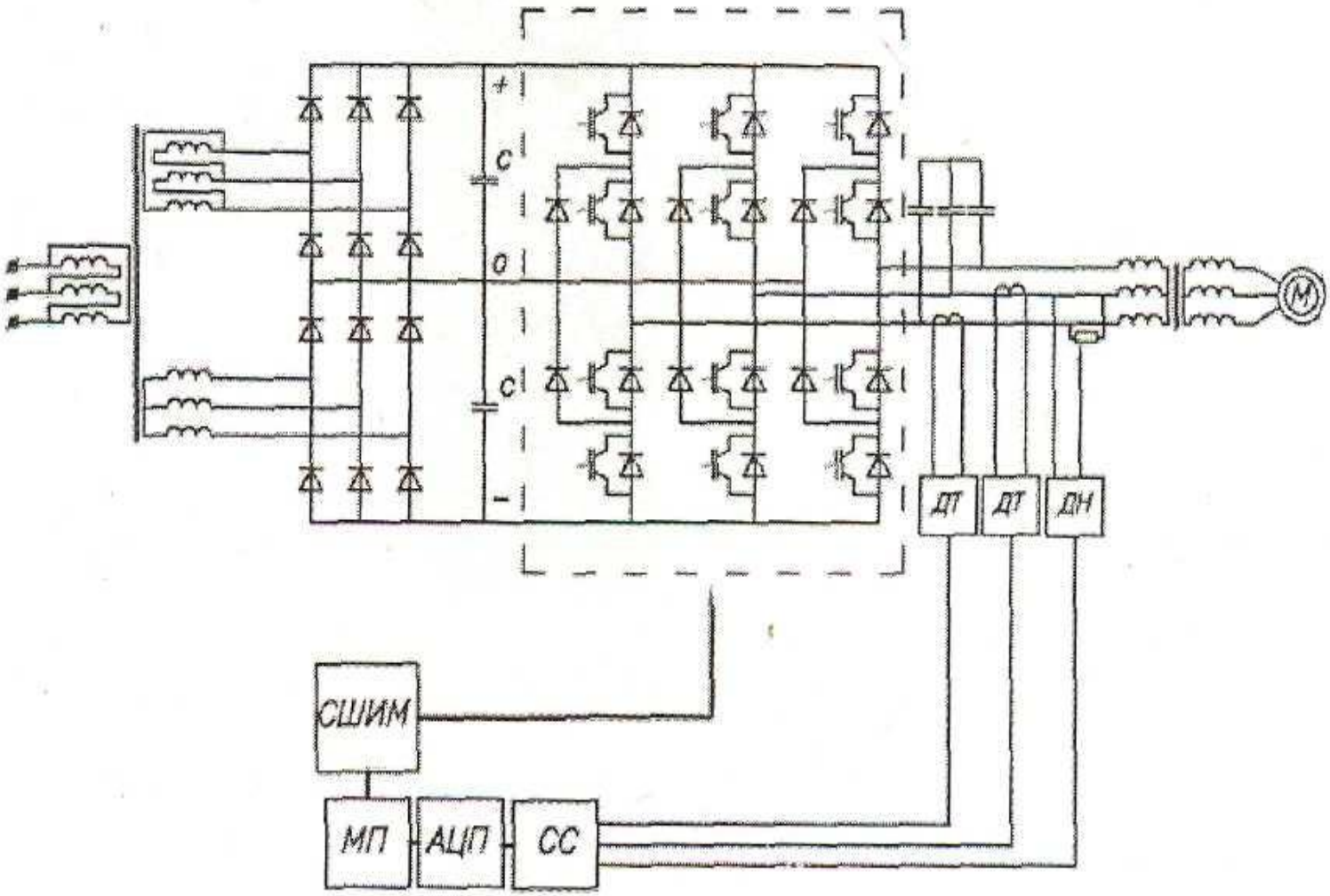
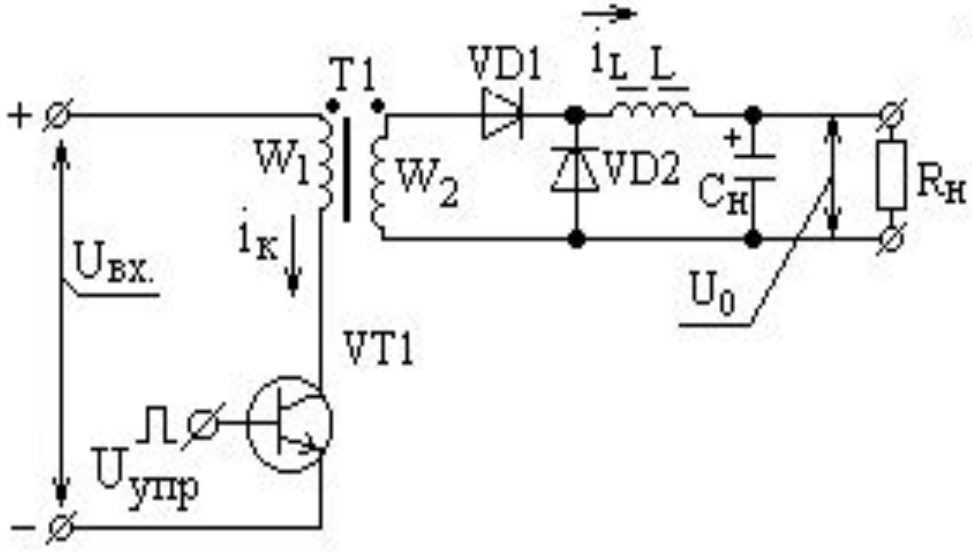
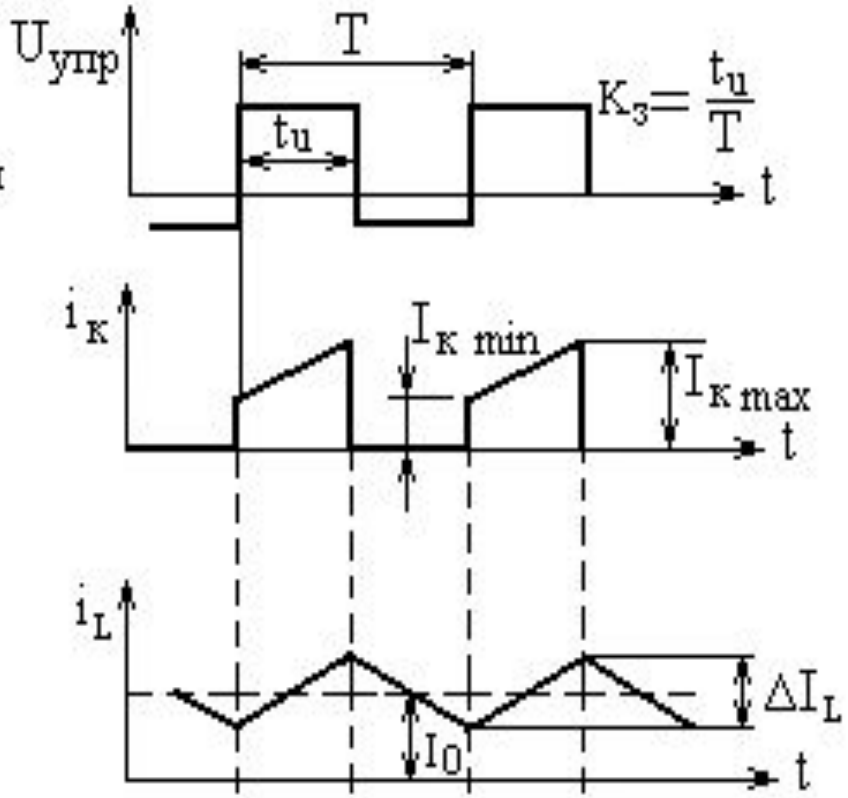
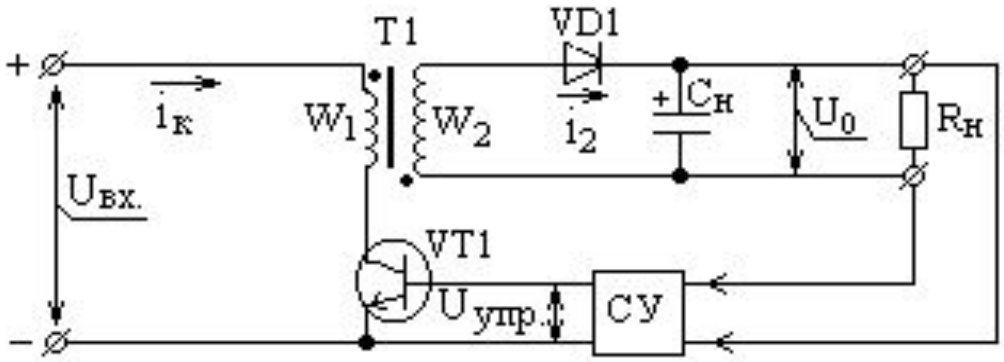
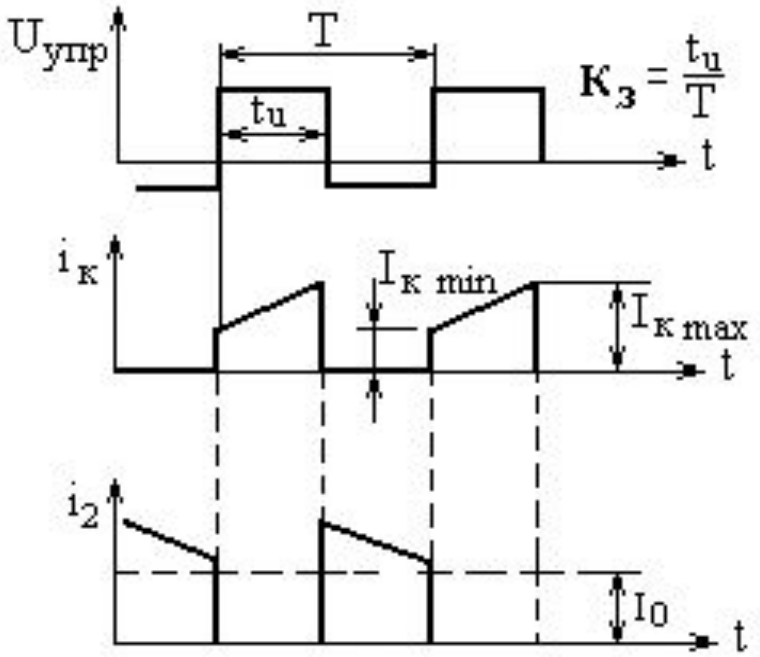


Схема трёхуровневого ПЧ со звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения



Прямоходовой преобразователь напряжения сети





Обратноходовой преобразователь напряжения сети