**Электронные устройства автоматических энергетических систем**

**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.

**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**

Разнообразие в видах потребляемой и вырабатываемой электроэнергии вызывает необходимость её преобразования. Преобразование электроэнергии осуществляется с помощью преобразователей, основными из которых являются:

**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.

Существует также ряд других, менее распространенных преобразователей: числа фаз, формы кривой тока и др.

В отдельных случаях используется комбинация нескольких видов преобразователей.

Преобразование электрической энергии может производиться как вращающимися электромашинными преобразователями, так и статическими преобразователями, выполненными на базе полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов, тиристоров). Однако значительные преимущества полупроводниковых преобразовательных устройств (более высокие регулировочные свойства и энергетические показатели, малые габариты и масса, простота, надежность в эксплуатации) предопределили наиболее широкое их применение в настоящее время.

Одной из основных областей эффективного использования устройств преобразовательной техники является электропривод. До 80% электрический энергии в механическую преобразуется с помощью электропривода.

Так как для целей электропривода наибольшее распространение находят тиристорные и транзисторные преобразователи, то им и будем уделять основное внимание.

# СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ЗАПИРАЕМЫЕ ТИРИСТОРЫ

Создание полупроводниковых приборов для силовой электроники началось в 1953 г. когда стало возможным получение кремния высокой чистоты и формирование кремниевых дисков больших размеров.

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

Он включался подачей импульса на электрод управления при положительном напряжении между анодом и катодом. Выключение тиристора обеспечивается снижением протекающего через него прямого тока до нуля, для чего разработано множество схем индуктивно-ёмкостных контуров коммутации. Они не только увеличивают стоимость преобразователя, но и ухудшают его массо - габаритные показатели, снижают надёжность.

Поэтому одновременно с созданием тиристора начались исследования, направленные на обеспечение его выключения по управляющему электроду. Главная проблема состояла в обеспечении быстрого рассасывания носителей зарядов в базовых областях.

Первые подобные тиристоры появились в 1960 г. в США. Они получили название Gate Turn Off (GTO). В нашей стране они больше известны как запираемые или выключаемые тиристоры.

В середине 90-х годов был разработан запираемый тиристор с кольцевым выводом управляющего электрода. Он получил название Gate Commutated Thyristor (GCT) и стал дальнейшем развитием GTO-технологии.

**1.1** Рассмотрим тиристоры GTO

***Устройство***

Запираемый тиристор - полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого классическая четырёхслойная структура. Включают и выключают его подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления. На рисунке 1.1 приведены условное обозначение (а) и структурная схема (б) выключаемого тиристора. Подобно обычному тиристору он имеет катод K, анод А, управляющий электрод G. Различия в структурах приборов заключается в ином расположении горизонтальных и вертикальных слоёв с n- и р-проводимостями.

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.gaw.ru/images/publ/tiristor/ris1.gif | http://www.gaw.ru/images/publ/tiristor/1b.gif |
| Рисунок 1.1 Запираемый тиристор:  а- условное обозначение; б- структурная схема. | |

Наибольшему изменению подверглось устройство катодного слоя n. Он разбит на несколько сотен элементарных ячеек, равномерно распределённых по площади и соединённых параллельно. Такое исполнение вызвано стремлением обеспечить равномерное снижение тока по всей площади полупроводниковой структуры при выключении прибора.

Базовый слой p, несмотря на то, что выполнен как единое целое, имеет большое число контактов управляющего электрода (примерно равное числу катодных ячеек), также равномерно распределённых по площади и соединённых параллельно. Базовый слой n выполнен аналогично соответствующему слою обычного тиристора.

Анодный слой p имеет шунты (зоны n), соединяющие n-базу с анодным контактом через небольшие распределённые сопротивления. Анодные шунты применяют в тиристорах, не обладающих обратной блокирующей способностью. Они предназначены для уменьшения времени выключения прибора за счёт улучшения условий извлечения зарядов из базовой области n.

Основное исполнение тиристоров GTO таблеточное с четырёхслойной кремниевой пластиной, зажатой 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.

***Принцип действия***

В цикле работы тиристора GTO различают четыре фазы: включение, проводящее состояние, выключение и блокирующее состояние.

На схематичном разрезе тиристорной структуры (рисунке 1.1,б) нижний вывод структуры анодный. Анод контактирует со слоем p. Затем снизу вверх следуют: базовый слой n, базовый слой p (имеющий вывод управляющего электрода), слой n, непосредственно контактирующий с катодным выводом. Четыре слоя образуют три p-n перехода: j1 между слоями p и n; j2 между слоями n и p;j3 между слоями p и n.

**Фаза 1** - включение. Переход тиристорной структуры из блокирующего состояния в проводящее (включение) возможен только при приложении прямого напряжения между анодом и катодом. Переходы j1 и j3 смещаются в прямом направлении и не препятствуют прохождению носителей зарядов. Всё напряжение прикладывается к среднему переходу j2, который смещается в обратном направлении. Около перехода j2 образуется зона, обеднённая носителями зарядов, получившая название- область объёмного заряда. Чтобы включить тиристор GTO, к управляющему электроду и катоду по цепи управления прикладывается напряжение положительной полярности UG (вывод "+" к слою p). В результате по цепи протекает ток включения IG.

Запираемые тиристоры предъявляют жёсткие требования к крутизне фронта dIG/dt и амплитуде IGM тока управления. Через переход j3, кроме тока утечки, начинает протекать ток включения IG. Создающие этот ток электроны будут инжектироваться из слоя n в слой p. Далее часть из них будет перебрасываться электрическим полем базового перехода j2 в слой n.

Одновременно увеличится встречная инжекция дырок из слоя p в слой n и далее в слой p, т.е. произойдёт увеличение тока, созданного неосновными носителями зарядов.

Cуммарный ток, проходящий через базовый переход j2, превышает ток включения, происходит открытие тиристора, после чего носители зарядов будут свободно переходить через все его четыре области.

**Фаза 2** - проводящее состояние. В режиме протекания прямого тока нет необходимости в токе управления IG, если ток в цепи анода превышает величину тока удержания. Однако на практике для того, чтобы все структуры выключаемого тиристора постоянно находились в проводящем состоянии, всё же необходимо поддержание тока, предусмотренного для данного температурного режима. Таким образом, всё время включения и проводящего состояния система управления формирует импульс тока положительной полярности.

В проводящем состоянии все области полупроводниковой структуры обеспечивают равномерное движение носителей зарядов (электронов от катода к аноду, дырок - в обратном направлении). Через переходы j1, j2 протекает анодный ток, через переход j3 - суммарный ток анода и управляющего электрода.

**Фаза 3** - выключение. Для выключения тиристора GTO при неизменной полярности напряжения UT (см. рис. 3) к управляющему электроду и катоду по цепи управления прикладывается напряжение отрицательной полярности UGR. Оно вызывает ток выключения, протекание которого ведёт к рассасыванию основных носителей заряда (дырок) в базовом слое p. Другими словами, происходит рекомбинация дырок, поступивших в слой p из базового слоя n, и электронов, поступивших в этот же слой по управляющему электроду.

По мере освобождения от них базового перехода j2 тиристор начинает запираться. Этот процесс характеризуется резким уменьшением прямого тока IТ тиристора за короткий промежуток времени до небольшой величины IТQT (см. рисунок 2). Сразу после запирания базового перехода j2 начинает закрываться переход j3, однако за счёт энергии, запасённой в индуктивности цепей управления он ещё некоторое время находится в приоткрытом состоянии.

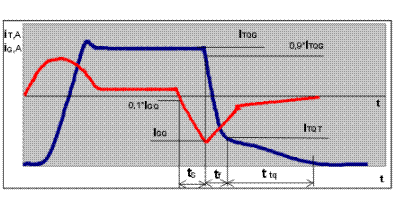


Рисунок 1.2. Графики изменения тока анода (iT) и управляющего электрода (iG)

После того, как вся энергия, запасённая в индуктивности цепи управления, будет израсходована, переход j3 со стороны катода полностью запирается. С этого момента ток через тиристор равен току утечки, который протекает от анода к катоду через цепь управляющего электрода.

Процесс рекомбинации и, следовательно, выключения запираемого тиристора во многом зависит от крутизны фронта dIGQ/dt и амплитуды IGQ обратного тока управления. Чтобы обеспечить необходимые крутизну и амплитуду этого тока, на управляющий электрод требуется подать напряжение UG, которое не должно превышать величины, допустимой для перехода j3.

**Фаза 4** - блокирующее состояние. В режиме блокирующего состояния к управляющему электроду и катоду остаётся приложенным напряжение отрицательной полярности UGR от блока управления. По цепи управления протекает суммарный ток IGR, состоящий из тока утечки тиристора и обратного тока управления, проходящего через переход j3. Переход j3 смещается в обратном направлении. Таким образом, в тиристоре GTO, находящемся в прямом блокирующем состоянии, два перехода (j2 и j3) смещены в обратном направлении и образованы две области пространственного заряда.

Всё время выключения и блокирующего состояния система управления формирует импульс отрицательной полярности.

***Защитные цепи***

Использование тиристоров GTO, требует применения специальных защитных цепей. Они увеличивают массо-габаритные показатели, стоимость преобразователя, иногда требуют дополнительных охлаждающих устройств, однако являются необходимыми для нормального функционирования приборов.

Назначение любой защитной цепи - ограничение скорости нарастания одного из двух параметров электрической энергии при коммутации полупроводникового прибора. При этом конденсаторы защитной цепи СВ (рисунок 3) подключают параллельно защищаемому прибору Т. Они ограничивают скорость нарастания прямого напряжения dUT/dt при выключении тиристора.

Дроссели LE устанавливают последовательно с прибором Т. Они ограничивают скорость нарастания прямого тока dIT/dt при включении тиристора. Значения dUT/dt и dIТ/dt для каждого прибора нормированы, их указывают в справочниках и паспортных данных на приборы.

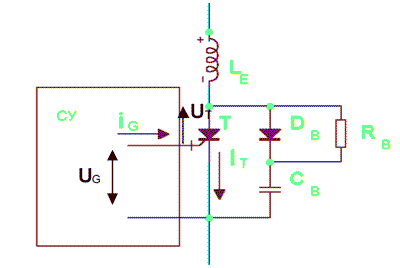


Рисунок 1.3. Схема защитной цепи

Кроме конденсаторов и дросселей, в защитных цепях используют дополнительные элементы, обеспечивающие разряд и заряд реактивных элементов. К ним относятся: диод DВ, который шунтирует резистор RВ при выключении тиристора Т и заряде конденсатора СВ, резистор RВ, ограничивающий ток разряда конденсатора СВ при включении тиристора Т.

***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.

Не для всех типов СУ нужны все перечисленные блоки, но контуры формирования отпирающих и запирающих импульсов должна содержать каждая СУ. При этом необходимо обеспечить гальваническую развязку схемы управления и силовой цепи выключаемого тиристора.

Для управления работой выключаемого тиристора применяются две основные СУ, отличающиеся способами подачи сигнала на управляющий электрод. В случае, представленном на рисунке 4, сигналы, формируемые логическим блоком St, подвергаются гальванической развязке (разделение потенциалов), после чего производится их подача через ключи SE и SA на управляющий электрод выключаемого тиристора Т. Во втором случае сигналы сначала воздействуют на ключи SE (включения) и SA (выключения), находящиеся под тем же потенциалом, что и СУ, затем через устройства гальванической развязки UE и UA подаются на управляющий электрод.

В зависимости от расположения ключей SE и SA различают низкопотенциальные (НПСУ) и высокопотенциальные (ВПСУ, рисунок 1.4) схемы управления.

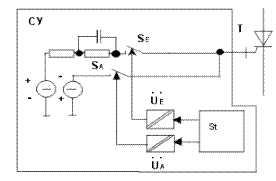


Рисунок 1.4. Вариант цепи управления

Система управления НПСУ конструктивно проще, чем ВПСУ, однако её возможности ограничены в отношении формирования управляющих сигналов большой длительности, действующих в режиме в режиме протекания через тиристор прямого тока, а также в обеспечении крутизны импульсов управления. Для формирования сигналов большой длительности здесь приходится использовать более дорогие двухтактные схемы.

В ВПСУ высокая крутизна и увеличенная длительность управляющего сигнала достигается проще. Кроме того, здесь сигнал управления используется полностью, в то время как в НПСУ его величина ограничивается устройством разделения потенциалов (например, импульсным трансформатором).

Информационный сигнал - команда на включение или выключение - обычно подаётся на схему через оптоэлектронный преобразователь.

## Тиристоры GCT

В середине 90-х годов фирмами "ABB" и "Mitsubishi" был разработан новый вид тиристоров Gate Commutated Thyristor (GCT). Собственно, GCT является дальнейшим усовершенствованием GTO, или его модернизацией. Однако, принципиально новая конструкция управляющего электрода, а также заметно отличающиеся процессы, происходящие при выключении прибора, делают целесообразным его рассмотрение.

GCT разрабатывался как прибор, лишённый недостатков, характерных для GTO, поэтому сначала необходимо остановится на проблемах, возникающих при работе GTO.

Основной недостаток GTO заключается в больших потерях энергии в защитных цепях прибора при его коммутации. Повышение частоты увеличивает потери, поэтому на практике тиристоры GTO коммутируются с частотой не более 250-300 Гц. Основные потери возникают в резисторе RВ (см. рисунок 3) при выключении тиристора Т и, следовательно, разряде конденсатора СВ.

Конденсатор СВ предназначен для ограничения скорости нарастания прямого напряжения du/dt при выключении прибора. Сделав тиристор не чувствительным к эффекту du/dt, создали возможность отказаться от снабберной цепи (цепи формирования траектории переключения), что и было реализовано в конструкции GCT.

***Особенность управления и конструкции***

Основной особенностью тиристоров GCT, по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение, которое достигается как изменением принципа управления, так и совершенствованием конструкции прибора. Быстрое выключение реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запирании прибора, что делает прибор не чувствительным к эффекту du/dt.

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 dig/dt, равной 3000 А/мкс и более (для тиристоров GTO значение dig/dt составляет 30-40 А/мкс).

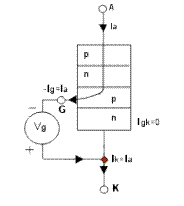


Рисунок 1.5. Распределение токов в структуре тиристора GCT при выключении

На рисунке 1.5 показано распределение токов в структуре тиристора GCT при выключении прибора. Как указывалось, процесс включения подобен включению тиристоров GTO. Процесс выключения отличен. После подачи отрицательного импульса управления (-Ig) равного по амплитуде величине анодного тока (Ia), весь прямой ток, проходящий через прибор, отклоняется в систему управления и достигает катода, минуя переход j3 (между областями p и n). Переход j3 смещается в обратном направлении, и катодный транзистор npn закрывается. Дальнейшее выключение GCT аналогично выключению любого биполярного транзистора, что не требует внешнего ограничения скорости нарастания прямого напряжения du/dt и, следовательно, допускает отсутствие снабберной цепочки.

Изменение конструкции GCT связано с тем, что динамические процессы, возникающие в приборе при выключении, протекают на один - два порядка быстрее, чем в GTO. Так, если минимальное время выключения и блокирующего состояния для GTO составляет 100 мкс, для GCT эта величина не превышает 10 мкс. Скорость нарастания тока управления при выключении GCT составляет 3000 А/мкс, GTO - не превышает 40 А/мкс.

Чтобы обеспечить высокую динамику коммутационных процессов, изменили конструкцию вывода управляющего электрода и соединение прибора с формирователем импульсов системы управления. Вывод выполнен кольцевым, опоясывающим прибор по окружности. Кольцо проходит сквозь керамический корпус тиристора и контактирует: внутри с ячейками управляющего электрода; снаружи - с пластиной, соединяющей управляющий электрод с формирователем импульсов.

Сейчас тиристоры GTO производят несколько крупных фирм Японии и Европы: "Toshiba", "Hitachi", "Mitsubishi", "ABB", "Eupec". Параметры приборов по напряжению UDRM : 2500 В, 4500 В, 6000 В; по току ITGQM (максимальный повторяющийся запираемый ток): 1000 А, 2000 А, 2500 А, 3000 А, 4000 А, 6000 А.

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

В настоящее время тиристоры GCT и GTO освоены на российском предприятии ОАО "Электровыпрямитель" (г. Саранск).Выпускаются тиристоры серий ТЗ-243, ТЗ-253, ТЗ-273, ЗТА-173, ЗТА-193, ЗТФ-193 (подобен GCT) и др. с диаметром кремниевой пластины до 125 мм и диапазоном напряжений UDRM 1200 - 6000 В и токов ITGQM 630 - 4000 А.

Параллельно с запираемыми тиристорами и для использования в комплекте с ними в ОАО "Электровыпрямитель" разработаны и освоены в серийном производстве быстровостанавливающиеся диоды для демпфирующих (снабберных) цепей и диоды обратного тока, а также мощный импульсный транзистор для выходных каскадов драйвера управления (система управления).

***Тиристоры IGCT***

Благодаря концепции жёсткого управления (тонкое регулирование легирующих профилей, мезатехнология, протонное и электронное облучение для создания специального распределения контролируемых рекомбинационных центров, технология так называемых прозрачных или тонких эмиттеров, применение буферного слоя в n - базовой области и др.) удалось добиться значительного улучшения характеристик GTO при выключении. Следующим крупным достижением в технологии жёстко управляемых GTO (HD GTO) с точки зрения прибора, управления и применения стала идея управляемых приборов базирующихся на новом "запираемом тиристоре 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. Сочетание с улучшенными показателями потерь мощности позволило найти новые области применения в килогерцовом диапазоне. Мощность, необходимая для управления, снижена в 5 раз по сравнению со стандартными GTO, в основном за счёт прозрачной конструкции анода. Новое семейство приборов IGCT, с монолитными интегрированными высоко мощными диодами было разработано для применения в диапазоне 0,5 - 6 МВ\*А. При существующей технической возможности последовательного и параллельного соединения приборы IGCT позволяют наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт - ампер.

При интегрированном блоке управления катодный ток снижается до того, как анодное напряжение начинает увеличиваться. Это достигается за счёт очень низкой индуктивности цепи управляющего электрода, реализуемой за счёт коаксиального соединения управляющего электрода в сочетании с многослойной платой блока управления. В результате стало возможным достигнуть значения скорости выключаемого тока 4 кА/мкс. При напряжении управления UGK=20 В. когда катодный ток становится равным нулю, оставшийся анодный ток переходит в блок управления, который имеет в этот момент низкое сопротивление. За счёт этого потребление энергии блоком управления минимизируется.

Работая при "жёстком" управлении, тиристор переходит при запирании из p-n-p-n состояния в p-n-p режим за 1 мкс. Выключение происходит полностью в транзисторном режиме, устраняя всякую возможность возникновения триггерного эффекта.

Уменьшение толщины прибора достигается за счёт использования буферного слоя на стороне анода. Буферный слой силовых полупроводников улучшает характеристики традиционных элементов за счёт снижения их толщины на 30% при том же прямом пробивном напряжении. Главное преймущество тонких элементов - улучшение технологических характеристик при низких статических и динамических потерях. Такой буферный слой в четырёхслойном приборе требует устранения анодных закороток, но при этом сохраняется эффективное освобождение электронов во время выключения. В новом приборе IGCT буферный слой комбинируется с прозрачным анодным эмиттером. Прозрачный анод - это p-n переход с управляемой током эффективностью эмиттера.

Для максимальной помехоустойчивости и компактности блок управления окружает IGCT, формируя единую конструкцию с охладителем, и содержит только ту часть схемы, которая необходима для управления непосредственно IGCT. Как следствие, уменьшено число элементов управляющего блока, снижены параметры рассеяния тепла, электрических и тепловых перегрузок. Поэтому, также существенно снижена стоимость блока управления и интенсивность отказов. IGCT, с его интегрированным управляющим блоком, легко фиксируется в модуле и точно соединяется с источником питания и источником управляющего сигнала через оптоволокно. Путём простого размыкания пружины, благодаря детально разработанной прижимной контактной системе, к IGCT прилагается правильно рассчитанное прижимное усилие, создающее электрический и тепловой контакт. Таким образом, достигается максимальное облегчение сборки и наибольшая надёжность. При работе IGCT без снаббера, обратный диод тоже должен работать без снаббера.

Основной производитель IGCT фирма "ABB".Параметры тиристоров по напряжению UDRM: 4500 В, 6000 В; по току ITGQM: 3000 А, 4000 А.

***Заключение по тиристорам***

Быстрое развитие в начале 90-х годов технологии силовых транзисторов привело к появлению нового класса приборов - биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors). Основными преимуществами IGBT являются высокие значения рабочей частоты, КПД, простота и компактность схем управления (вследствие малости тока управления).

Появление в последние годы IGBT с рабочим напряжением до 4500 В и способностью коммутировать токи до 1800 А привело к вытеснению запираемых тиристоров (GTO) в устройствах мощностью до 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Однако новые приборы IGCT, способные работать с частотами переключения от 500 Гц до 2 кГц и имеющие более высокие параметры по сравнению с IGBT транзисторами, сочетают в себе оптимальную комбинацию доказанных технологий тиристоров с присущими им низкими потерями, и бесснабберной, высокоэффективной технологией выключения путём воздействия на управляющий электрод. Прибор IGCT сегодня - идеальное решение для применения в области силовой электроники среднего и высокого напряжений.

|  |  |
| --- | --- |
| Транзисторы2.1 IGBT транзисторы |  |

|  |  |
| --- | --- |
|  | IGBT транзисторы**Биполярные транзисторы с изолированным затвором** являются новым типом активного прибора, который появился сравнительно недавно. Его входные характеристики подобны входным характеристикам полевого транзистора, а выходные – выходным характеристикам биполярного.  В литературе этот прибор называют **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**. По быстродействию они значительно превосходят [биполярные транзисторы](http://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/764-bipoljarnye-tranzistory.html). 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.  IGBT транзисторыIGBT-транзисторы вытесняют тиристоры из высоковольтных схем преобразования частоты и позволяют создать импульсные источники вторичного электропитания с качественно лучшими характеристиками. IGBT-транзисторы используются достаточно широко в инверторах для управления электродвигателями, в мощных системах бесперебойного питания с напряжениями свыше 1 кВ и токами в сотни ампер. В какой-то степени это является следствием того, что во включенном состоянии при токах в сотни ампер падение напряжения на транзисторе находится в пределах 1,5 - 3,5В.  Как видно из структуры IGBT-транзистора (рисунок 2. 1), это достаточно сложный прибор, в котором транзистор типа р–n–р управляется МОП-транзистором с каналом типа n.  [Структура IGBT-транзистора](http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/)  Рисунок 2. 1 Структура IGBT-транзистора    Коллектор IGBT-транзистора (рисунок 2.2,а) является эмиттером транзистора VT4. При подаче положительного напряжения на затвор у транзистора VT1 появляется электропроводный канал. Через него эмиттер транзистора IGBT (коллектор транзистора VT4) оказывается соединенным с базой транзистора VT4.  Это приводит к тому, что он полностью отпирается и падение напряжения между коллектором транзистора IGBT и его эмиттером становится равным падению напряжения на эмиттерном переходе транзистора VT4, просуммированному с падением напряжения Uси на транзисторе VT1.  В связи с тем, что падение напряжения на р–n-переходе уменьшается с увеличением температуры, падение напряжения на отпертом IGBT-транзисторе в определенном диапазоне токов имеет отрицательный температурный коэффициент, который становится положительным при большом токе. Поэтому падение напряжения на IGBT-транзисторе не опускается ниже порогового напряжения диода (эмиттерного перехода VТ4).  [Эквивалентная схема IGBT-транзистора (а) и его условное обозначение в отечественной (б) и иностранной (в) литературе](http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/)  Рисунок 2.2. Эквивалентная схема IGBT-транзистора (а)  его условное обозначение в отечественной (б)  и иностранной (в) литературе  При увеличении напряжения, приложенного к транзистору IGBT, увеличивается ток канала, определяющий ток базы транзистора VT4, при этом падение напряжения на IGBT-транзисторе уменьшается.  IGBT транзисторыПри запирании транзистора VT1 ток транзистора VT4 становится малым, что позволяет считать его запертым. Дополнительные слои введены для исключения режимов работы, характерных для тиристоров, когда происходит лавинный пробой. Буферный слой n+ и широкая базовая область n– обеспечивают уменьшение коэффициента усиления по току p–n–p-транзистора.  Общая картина включения и выключения достаточно сложная, так как наблюдаются изменения подвижности носителей заряда, коэффициентов передачи тока у имеющихся в структуре p–n–p- и n–p–n-транзисторов, изменения сопротивлений областей и пр. Хотя в принципе IGBT–транзисторы могут быть использованы для работы в линейном режиме, пока в основном их применяют в ключевом режиме.  При этом изменения напряжений у коммутируемого ключа характеризуются кривыми, показанными на рисунке 2.3.  [http://electricalschool.info/uploads/posts/2011-07/1311078598_3.jpg](http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/)  Рисунок 2.3. Изменение падения напряжения Uкэ и тока Ic IGBT-транзистора  [Схема замещения транзистора типа IGBT (а) и его вольт-амперные характеристики (б](http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/)    Рисунок 2.4 Схема замещения транзистора типа IGBT (а) и его вольт-амперные характеристики (б)  Исследования показали, что 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 (рис. 5, а – г).  [Условные обозначения модулей на IGBT-транзисторах: а – МТКИД; б – МТКИ; в – М2ТКИ; г - МДТКИ](http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/)  Рисунок 2.5. Условные обозначения модулей на IGBT-транзисторах: а – МТКИД; б – МТКИ; в – М2ТКИ; г - МДТКИ  Условные обозначения IGBT-транзисторов включают: букву М – модуль беспотенциальный (основание изолировано); 2 – количество ключей; буквы ТКИ – биполярный с изолированным затвором; ДТКИ – диод/биполярный транзистор с изолированным затвором; ТКИД – биполярный транзистор с изолированным затвором/диод; цифры: 25, 35, 50, 75, 80, 110, 150 – максимальный ток; цифры: 1, 2, 5, 6, 10, 12 – максимальное напряжение между коллектором и эмиттером Uкэ (\*100В). Например модуль МТКИД-75-17 имеет UКЭ =1700 В, I=2\*75А, UКЭотк =3,5 В, PKmax =625 Вт. |

## MOSFET транзисторы

Наиболее распространены транзисторы с индуцированным каналом ([англ.](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *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.](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *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».

Если транзистор n-канальный:

* он открывается положительным напряжением на затворе по отношению к истоку.
* паразитный диод в структуре канала катодом подсоединен к стоку, анодом — к истоку.
* канал обычно подсоединяют так, что на стоке более положительное напряжение, чем на истоке.

Если транзистор p-канальный:

* он открывается отрицательным напряжением на затворе по отношению к истоку.
* паразитный диод в структуре канала анодом подсоединен к стоку, катодом — к истоку.
* канал обычно подсоединяют так, что на стоке более отрицательное напряжение, чем на истоке.

Некоторые виды мощных переключательных транзисторов снабжаются специальным отводом от части канала с целью контроля тока через транзистор. Такой прием позволяет избежать дополнительных потерь на внешних токоизмерительных шунтах.

## Условные графические обозначения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| [IGFET P-Ch Enh Labelled.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IGFET_P-Ch_Enh_Labelled.svg?uselang=ru) | [IGFET P-Ch Dep Labelled.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IGFET_P-Ch_Dep_Labelled.svg?uselang=ru) | P-канал |
| [IGFET N-Ch Enh Labelled.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IGFET_N-Ch_Enh_Labelled.svg?uselang=ru) | [IGFET N-Ch Dep Labelled.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IGFET_N-Ch_Dep_Labelled.svg?uselang=ru) | N-канал |
| Индуцированный канал | Встроенный канал |  |

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

Хотя формально разделение индуцированного и встроенного каналов предусмотрено на условном графическом обозначении, на практике оно довольно часто не соблюдается.

## 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, для подавления высокочастотных колебаний и мощных импульсов тока, возникающих при переключении транзистора из-за индуктивности подводящих шин. Высокочастотные колебания и импульсные токи увеличивают нагрев транзистора и могут вывести его из строя (если транзистор работает на пределе своих тепловых возможностей). Снаббер также защищает от самооткрывания транзистора при превышении скорости нарастания напряжения на выводах Сток-Исток (Drain-Source).
2. Быстрый защитный диод, включённый параллельно истоку-стоку (обратное включение), для шунтирования импульса тока, образующегося при отключении индуктивной нагрузки.
3. Если транзисторы работают в мостовой или полумостовой схеме на высокой частоте (сварочные инверторы, индукционные нагреватели, импульсные источники питания), то помимо защитного диода в цепь стока встречно включается диод Шоттки для блокирования паразитного диода. Паразитный диод имеет большое время запирания, что может привести к сквозным токам и выходу транзисторов из строя.
4. Резистор, включённый между истоком и затвором, для сброса заряда с затвора. Затвор удерживает электрический заряд как конденсатор, и после снятия управляющего сигнала MOSFET-транзистор может не закрыться (или закрыться частично, что приведёт к повышению его сопротивления, нагреву и выходу из строя). Величина резистора подбирается таким образом, чтобы не мешать управлению транзистором, но в то же время как можно быстрее сбрасывать электрический заряд с затвора.
5. Резистор, включённый в цепь затвора, для уменьшения тока заряда затвора. Затвор мощного полевого транзистора обладает достаточно высокой ёмкостью, представляет из себя фактически конденсатор ёмкостью несколько десятков нФ, что приводит к значительным импульсным токам в момент зарядки затвора (единицы ампер). Большие импульсные токи могут повредить схему управления затвором транзистора.
6. Управление мощным MOSFET-транзистором, работающем в ключевом режиме на высоких частотах осуществляют с помощью [драйвера](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%80%D0%B0%D0%B9%D0%B2%D0%B5%D1%80_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0)) — специальной схемы или готовой микросхемы, усиливающей управляющий сигнал и обеспечивающей большой импульсный ток для быстрой зарядки затвора транзистора. Это увеличивает скорость работы транзистора.
7. В сильно зашумлённых или находящихся под большим током цепях к выходу микросхем, основанных на MOSFET-структурах, подключают два обратно включённых диода Шоттки, т. н. диодную вилку (один диод — с общего провода на вход, другой — со входа на шину питания) для предотвращения явления «защёлкивания» МОП-структуры.

# Последовательное и параллельное включение диодов и тиристоров

На практике нередко возникают ситуации, когда допустимое среднее значение прямого тока диода оказывается недостаточным для обеспечения больших токов нагрузки; в этих случаях приходится применять параллельное соединение диодов. Однако при параллельном включении диодов из-за несовпадения их ВАХ токи в диодах будут неодинаковыми (рисунок 3.1,а). Для выравнивания токов при параллельном включении диодов в маломощных выпрямителях последовательно с ними устанавливаются резисторы с одинаковыми сопротивлениями, включение которых позволяет уменьшить разность токов в диодах (рисунок 3.1,а, *б).* Однако эти резисторы уменьшают КПД схемы, и поэтому применять их в мощных выпрямителях не рекомендуется.

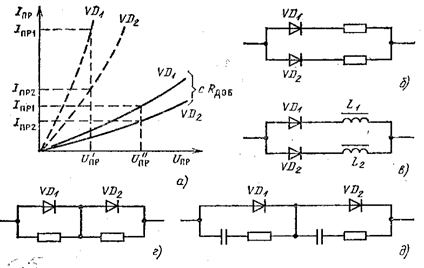


Рисунок3.1 Параллельное и последовательное соединения диодов

Если диоды включаются параллельно без уравнительных сопротивлений, то необходимо применить заведомо увеличенное число диодов, тем самым уменьшить ток в каждом из них, а значит, исключить опасность перегрузки.

В мощных выпрямителях вместо резисторов последовательно с каждым диодом включают специальные токовыравнивающие реакторы (дроссели с сердечниками *L1, L2).* На этих дросселях (рисунок 3.1, в) при протекании тока создается противо-ЭДС, пропорциональная этому току, что и приводит к выравниванию токов дросселей, а значит, и диодов.

Диоды одного типа можно соединить последовательно для увеличения обратного допустимого напряжения. Однако из-за несовпадения обратных ветвей ВАХ обратные напряжения распределятся между диодами неравномерно. Для выравнивания обратных напряжений диоды малой и средней мощности необходимо шунтировать высокоомными резисторами (рисунок 3.1,г).

Если диоды включаются последовательно без шунтирующих резисторов, то необходимо заведомо увеличить число диодов при этом обратное напряжение на каждом из них снижается (не менее чем на 25 %) и исключается опасность перенапряжении.

В выпрямителях большой мощности этот способ выравнивания непригоден из-за значительных потерь в шунтирующих резисторах. Поэтому в этих случаях применяются шунтирующие RС-цепочки (рисунок 3.1д), причем сопротивление шунтирующих резисторов равно 500-2000 Ом (меньшее значение соответствует более мощным диодам); включение конденсаторов позволяет снизить коммутационные перенапряжения. Иногда в качестве реактивных делителей включаются только шунтирующие конденсаторы.

Поскольку германиевые и кремниевые диоды чувствительны к токовым перегрузкам и перенапряжениям, то необходимо принимать специальные меры по защите этих диодов и всей системы электропитания. Кремниевые диоды с лавинными характеристиками выдерживают кратковременные перенапряжения, что упрощает их защиту.

# СИЛОВЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

## 4.1 Однофазный УВ с выводом от средней точки вторичной обмотки

## трансформатора

На рисунке 4.1 приведена схема однофазного управляемого выпрямителя с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора.

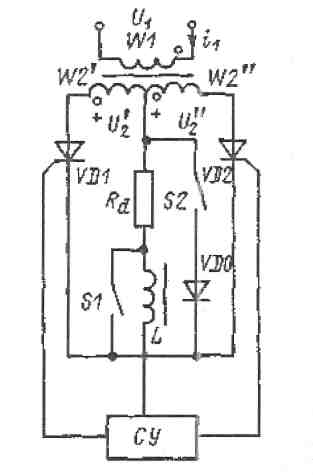


Рисунок 4.1. Однофазный управляемый выпрямитель

Рассмотрим работу схемы на чисто активную нагрузку: *S1* замкнут, *S2* разомкнут. Если на входе выпрямителя имеет место положительная полуволна напряжения сети (на рисунке 4.1 полярности напряжения без скобок), то в интервале *0..t1* (рисунок 4.2, а) оба тиристора *VD1* и *VD2* закрыты, напряжение на нагрузке равно нулю. Тиристор *VD1* находится под прямым напряжением, а *VD2* - под обратным (рисунок 4.2, д).

В момент времени *t1* от схемы управления СУ на тиристор *VD1* поступает управляющий импульс, тиристор скачком открывается, напряжение на нем падает до нуля (прямым падением напряжения на тиристоре в большинстве случаев можно пренебречь, так как d*Ud <<U2)* и

все напряжение половины вторичной обмотки трансформатора прикладывается к нагрузке. Естественно, ток в активной нагрузке будет меняться до конца полупериода пропорционально напряжению.

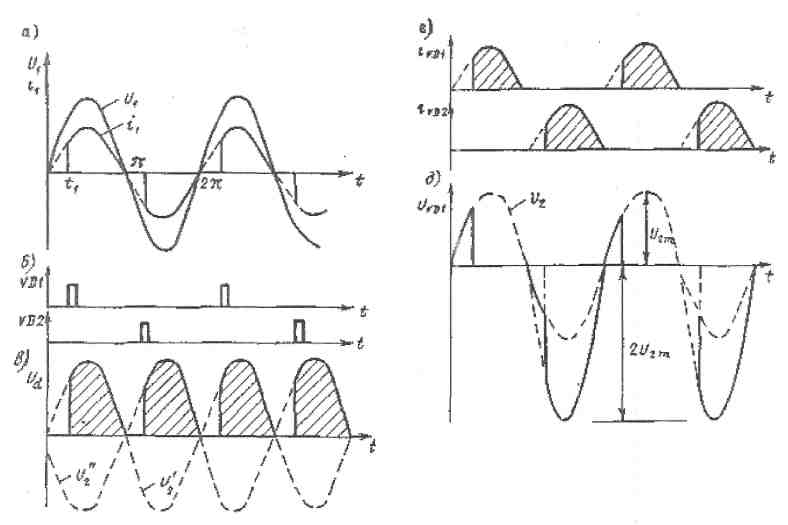


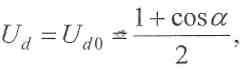
Рисунок 4.2. Диаграмма работы однофазного нулевого УВ на активную нагрузку

В момент времени *t* =π напряжение и ток вторичной обмотки трансформатора падают до нуля и *VD1* закрывается. Так как никаких специальных мер для запирания тиристора не принимается, такой процесс называется естественной коммутацией.

В момент *t2* подается отпирающий импульс на тиристор *VD2.* Он включается, и в нагрузке формируется такой же сигнал, как и при включении *VD1.* Таким образом, через нагрузку будет протекать ток, форма которого показана на рисунке 4.2, г, а среднее значение напряжения определяется заштрихованными площадками. Очевидно, что чем раньше в полупериоде будет подан управляющий сигнал, тем больше будет среднее значение тока и напряжения в нагрузке, и наоборот.

Если угол управления , режим работы УВ не отличается от работы неуправляемого выпрямителя

*Ud*=0.9 *U2*.

называется регулировочной характеристикой выпрямителя.

На рисунке 4.3 приведена регулировочная характеристика однофазного УВ для *L = 0.* Ток первичной обмотки трансформатора повторяет по форме (с учетом коэффициента трансформации) ток во вторичной обмотке и, если *а=0*, имеет паузы в интервалах *а.* Его первая гармоника имеет фазовый сдвиг в сторону отставания относительно *Uj* даже при активной нагрузке

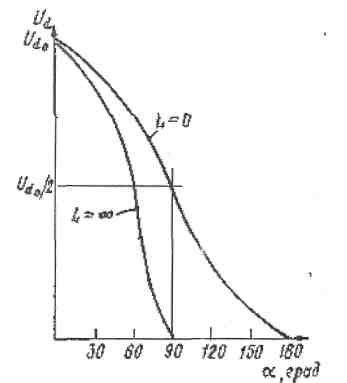


Рисунок 4.3. Регулировочная характеристика однофазного УВ при работе на активную и индуктивную нагрузку

Прямое напряжение на тиристоре изменяется по закону *U2* до момента отпирания тиристора, и максимальное значение может достигнуть

Обратное напряжение запертого тиристора (см. рисунок 3.2, д)

меняется по такому же закону до момента отпирания второго, а затем к первому прикладывается обратное напряжение обеих половин вторичной обмотки, и максимальное значение может достичь величины



Итак, характерными качествами УВ, работающего на активную нагрузку, являются предельный угол регулирования индуктивный характер первичного тока при *а =* 90°.

Индуктивная нагрузка УВ (на рисунке 4.1 *S1* и *S2* разомкнуты) вносит существенные отличия в его работу. Так, если принять индуктивность достаточно большой *(wL»5Rd),* то ток нагрузки можно (при данном *а)* считать постоянным, практически полностью сглаженным (рисунок 4.4, в), а ток, протекающий по вторичным обмоткам и через вентили, состоящим из прямоугольных отрезков (рисунок 4.4, г), амплитуда которых равна Id.

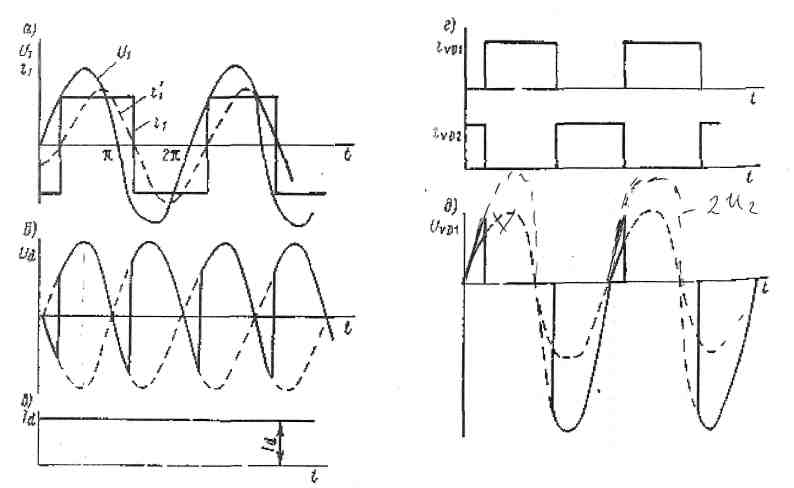
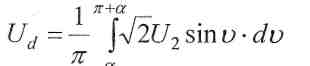


Рисунок 4.4. Диаграмма работы однофазного нулевого УВ на индуктивную нагрузку

Так как включение очередного тиристора, например *VD2,* происходит с запаздыванием на угол по отношению к моменту перехода вторичного напряжения через нуль, а ток через работающий вентиль должен протекать до тех пор, пока не включится *VD2,* то возникают интервалы времени, когда ток (под действием электромагнитной энергии, запасенной в дросселе) протекает при отрицательном напряжении на обмотке, т.е. в кривой напряжения *Ud* (рисунке 4.4, б) появляются участки напряжения отрицательной полярности. Иначе говоря, среднее значение напряжения *Ud* при данном будет меньше. При площади фигур, описываемые кривой положительной и отрицательной полярности будут одинаковыми, т. е. будет равно нулю. Регулировочная характеристика УВ будет описываться выражением



откуда

Потребляемый от сети ток i1 состоит из прямоугольных импульсов с амплитудой(- коэффициент трансформации), его первая гармоника сдвинута в сторону отставания на угол относительно напряжения питания (рисунок 4.4, а).

Кривая напряжения на тиристоре состоит из участков напряжения, равного , т. е. сумме напряжения на обеих обмотках. Так как один

тиристор постоянно включен, максимальное обратное напряжение (для  ), как и максимальное прямое (для), равно

При работе УВ данного вида на активно-индуктивную нагрузку при меньших значениях индуктивностипервичный и вторичный токи будут иметь вид отрезков, близких к синусоиде, но ток будет достигать нулевого значения при угле, большем , но меньшем  (при определенных соотношениях  и ), т. е. токбудет прерывистым, форма U*d -* промежуточной между рассмотренными выше, а регулировочная характеристика для такой нагрузки будет располагаться между характеристиками для

Как было уже упомянуто, первая гармоника входного тока будет отставать от входного напряжения даже при активной нагрузке, а при индуктивнойи больших углах регулирования становится очень низким. Это приводит к потреблению от сети значительной реактивной мощности, увеличению потерь в обмотках и сети, дополнительной загрузке генератора и т. д. Несколько ослабить отрицательные последствия этого явления можно, применив так называемый нулевой диод *VD0,* для чего необходимо включить *S2* (см. рисунок 4.1). Следует иметь в виду, что применение *VD0* имеет смысл только при индуктивной нагрузке.

Диаграмма работы такой схемы приведена на рисунке 4.5. При положительном полупериоде вторичного напряжения ток через *W1'*протекает с момента включения *VD1,* но как только напряжение U2 спадает до нуля, тиристор *VD1* запирается, а контур тока замыкается через *VDO (L-VD0-Rн)* т.е. вторичная обмотка не работает. Этот режим продолжается до момента включения *VD2,* затем ток с *VD2*переходит на *VD0*и процесс повторяется. Кривые напряжения на тиристоре аналогичны кривым при работе данной схемы на чисто активную нагрузку (см. рис. 2). Так как в кривой тока вторичных обмоток появляются паузы (пока ток нагрузки протекает через нулевой диод), то точно такую же форму с учетом коэффициента трансформации будет иметь и ток Следовательно первая гармоника входного тока будет теперь сдвинута по отношению к *U1* на угол *a/2* (вместо), т. е.схемы будет теперь выше ().

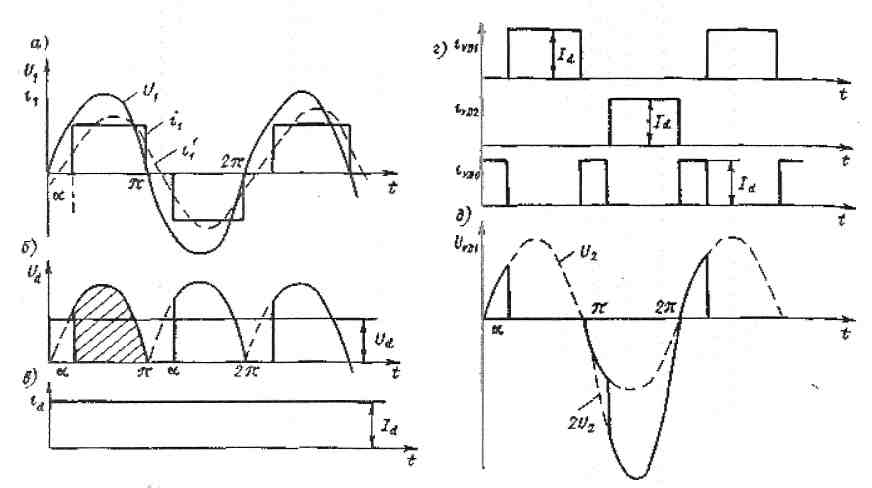
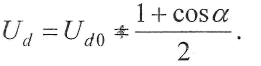


Рисунок 4.5. Диаграмма работы однофазного УВ с нулевым диодом

Регулировочная характеристика УВ с нулевым диодом совпадает с характеристикой схемы для активной нагрузки, т. е.



Таким образом, применение нулевого диода позволяет уменьшить нагрузку на тиристоры (в особенности при больших ) и поднять выпрямителя.

**Однофазный мостовой управляемый выпрямитель.**

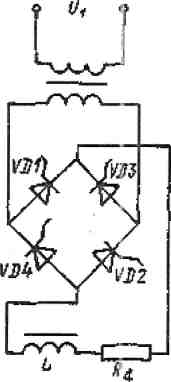


Рисунок 4. 6. Однофазный мостовой УВ

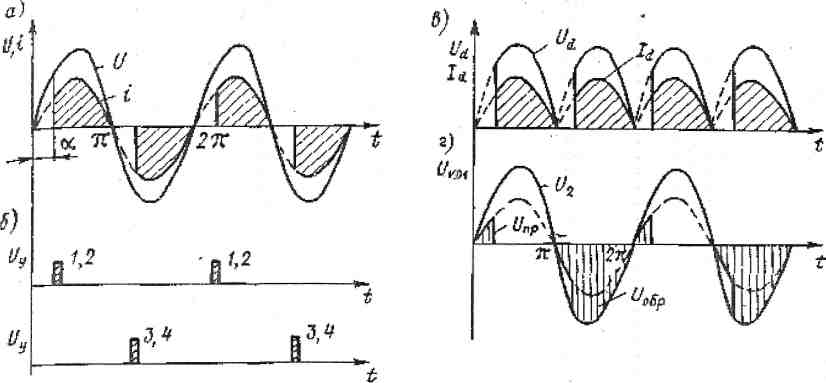


Рисунок 4.7. Диаграмма работы однофазного мостового УВ на активную нагрузку

Такая схема (рисунок 4.6) включает четыре тиристора; вторичная обмотка не имеет отвода от средней точки, схема управления должна обеспечивать одно­временное открытие двух тиристоров, расположенных в противоположных плечах моста. Диаграмма работы схемы на активную нагрузку приведена на рисунок 4. 7, на активно-индуктивную и индуктивную - на рисунок 4.8.

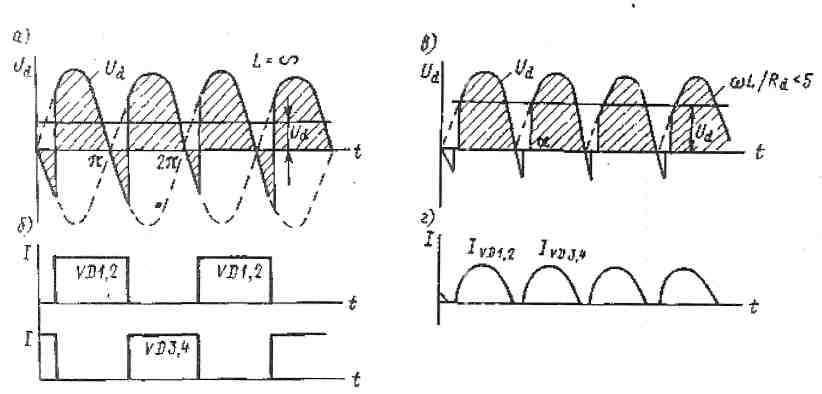


Рисунок 4.8. Диаграмма работы однофазного мостового УВ на активно-индуктивную нагрузку

Режим работы и регулировочные характеристики мостового УВ с полным числом управляемых вентилей аналогичны таковым для УВ с нулевым выводом. Но есть одно отличие: для нулевой схемы кривая напряжения на вентилях формируется из участков синусоиды амплитудой  , а для мостовой схемы -, т. е. вентили можно выбирать на вдвое меньшее обратное напряжение. Правда, потери на прямое падение напряжения у мостовой схемы вдвое больше. Все остальные характеристики указанных схем и диаграмма работы идентичны.

В некоторых случаях возможно применение мостового УВ с неполным числом управляемых вентилей, например, если в схеме (см. рисунок 4.6) оставить *VD1* и *VD3* управляемыми (тиристоры), а в качестве *VD2* и *VD4* поставить неуправляемые диоды. Режим работы схемы будет аналогичен рассмотренному режиму схемы УВ с нулевым выводом и *VDO.* Если, т.е. *id* идеально сглажен, то схема работает следующим образом (см. рис6). С задержкой a управляющим сигналом отпирается тиристор *VD1,* на интервалеток нагрузки протекает через обмотку, вентили *VD1* и *VD2* и, В момент  полярность напряжения *U2* меняется на обратную, диод *VD2* запирается, но, так как ток прекратиться не может (), то он протекает через тот же тиристор *VD1* и открывшийся диод *VD4,* цепь нагрузки закорочена, источником питания является индуктивность, трансформатор не работает. В момент времени отпирается тиристор *VD3,* тогда *VD1* сразу же закрывается, так как к нему прикладывается обратное напряжение, и работает вторая цепь схемыДалее процесс повторяется.

Таким образом, на интервале, равном углу регулирования *а,* тока через вторичную, а следовательно первичную обмотку, нет, угол сдвига первой гармоники входного тока, в кривойотсутствуют участки напряжения U2 отрицательной полярности.

Возможно использование и несколько иной схемы: управляемые вентили *VD1* и *VD4,* а неуправляемые - *VD2* и *VD3.* Характер работы схемы сохранится, только изменятся интервалы проводящих состояний вентилей.

Как указывалось выше, однофазные выпрямители в силовой технике практически не применяются, поэтому далее будут рассмотрены трех- и шестифазные схемы, однако к. однофазным придется еще неоднократно возвращаться для пояснения ряда эффектов, возникающих в управляемых выпрямителях.

# ТРЕХФАЗНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ВЫВОДОМ ОТ СРЕДНЕЙ ТОЧКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрим такую схему с соединением вторичных обмоток трансформатора в звезду (рисунке 5.1, а). При  она работает как неуправляемый выпрямитель. Каждый вентиль работает 1/3 периода, когда в обмотке, к которой он подключен, имеет место' наивысшее напряжение (другие вентили в этот момент заперты, так как находятся под обратным напряжением). Переход тока от вентиля к вентилю осуществляется в момент пересечения кривых фазных напряжений, выпрямленный ток протекает через нагрузку постоянно (пульсирующий).

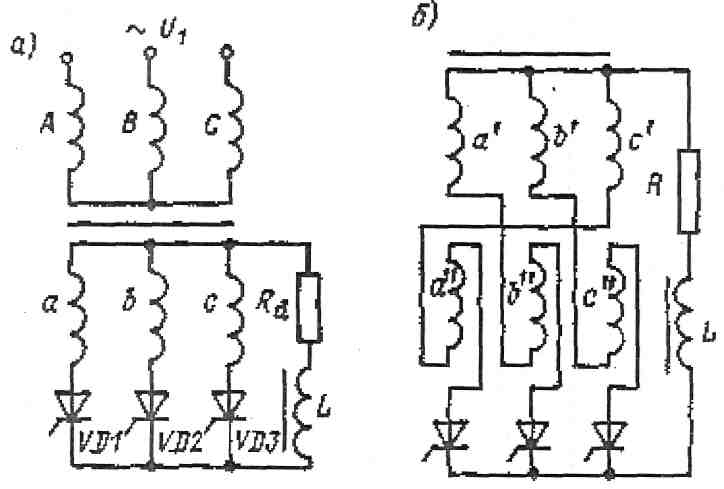
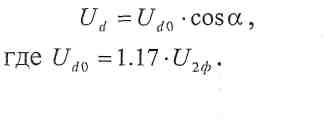


Рисунок 5.1. Трехфазный УВ с выводом от средней точки трансформатора (а) и с соединением обмоток в зигзаг (б)

При работа схемы в большей степени зависит от характера нагрузки. Диаграммы напряжений и токов при чисто активной нагрузке для разных углов регулирования а приведены на рисунке 5.2. При  процесс

отпирания очередного тиристора (например, *VD1,* включенного в фазу *а)* происходит до того момента, когда напряжение в предыдущей фазе *с* еще не снизилось до нуля. В результате ранее работавший тиристор *VD3* закроется, так как напряжение в фазе *с* меньше, чем в фазе *а,* ток. нагрузки перейдет из фазы *с* в фазу *а,* но до нулевого значения не упадет, т. е. останется непрерывным. Критическая точка -

При изменении α в этих пределах регулировочная характеристика описывается уравнением



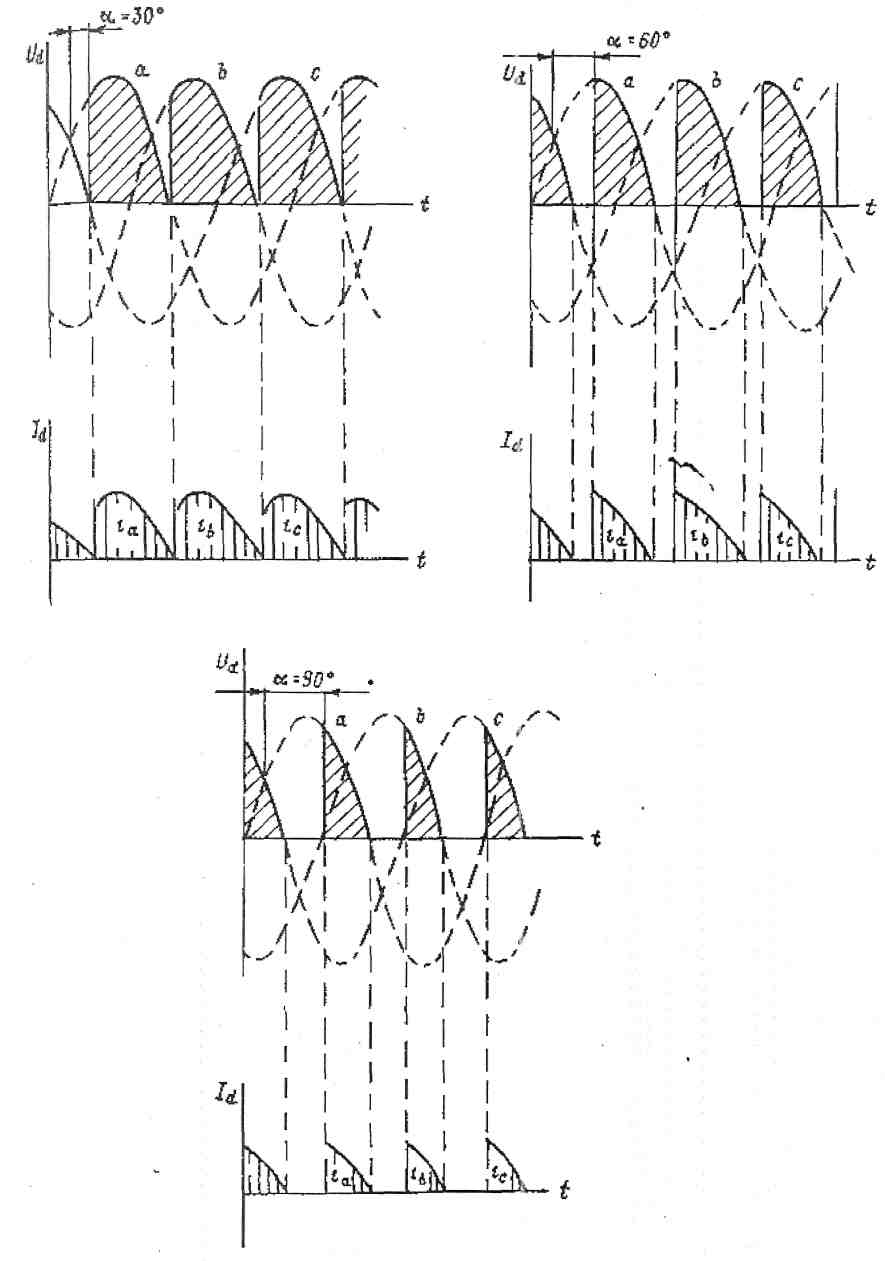


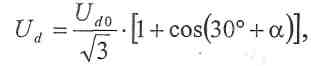
Рисунок 5.2. Диаграммы работы трехфазного нулевого УВ на активную нагрузку при различных углах регулирования

Присигнал на открытие очередного тиристора подается после

того, как естественным образом закроется предыдущий, т. е. в кривой выпрямленного тока появляются паузы, гдеДлительность прохождени

тока через каждый вентиль становится меньше трети периода. В этом случае регулировочная характеристика будет описываться уравнением

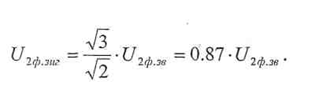




предельный угол регулирования на активную нагрузку составляет

При соединении вторичных обмоток в звезду в каждой из них ток протекает только в одном направлении. В сердечниках трансформатора возникает явление подмагничивания постоянной составляющей вторичного тока (потоки вынужденного подмагничивания). Это может привести к насыщению магнитопровода, увеличению намагничивающего тока и появлению дополнительных нелинейностей в кривой тока нагрузки. Для устранения этого явления приходится либо увеличивать сечение магнитопровода, либо включать первичную обмотку в треугольник (при этом увеличивается ток в ней), либо использовать соединение вторичной обмотки в зигзаг (рисунок 5.1,б).

При таком включении токи по секциям каждой обмотки протекают в разных направлениях, в результате среднее значение постоянной составляющей тока в каждой обмотке будет равно нулю. Но вторичное напряжение уменьшится, так как две полуобмотки будут включены не последовательно, а под углом 120°:



Для получения ранее запланированной мощности трансформатора его габариты должны быть больше наили

При работе на индуктивную нагрузку (рис. 3) каждый вентиль работает 1/3 периода, ток в нагрузке непрерывный. В кривой выпрямленного напряженияприпоявляются участки отрицательного напряжения,

поэтому среднее его значение уменьшается:и

Обратное напряжение на вентиле может быть определено графически. Например, для вентиля *VD1* (фаза *а)* оно определяется из рис. 3 как разность между кривойформируемой участками синусоид Ubи *Uc,* и обратным напряжением Его максимальное значение

Прямое напряжение на вентиле

При активной нагрузке и для  формула та же, для



Основные достоинства этой схемы - минимальное количество силовых элементов (тиристоров) и самая простая структура системы управления (СУ). СУ может подключаться между управляющими электродами тиристоров и их общим катодом и должна обеспечивать одиночные управляющие сигналы. Несмотря на необходимость применения силового трансформатора с определенными свойствами, такие трехфазные УВ получили широкое распространение.

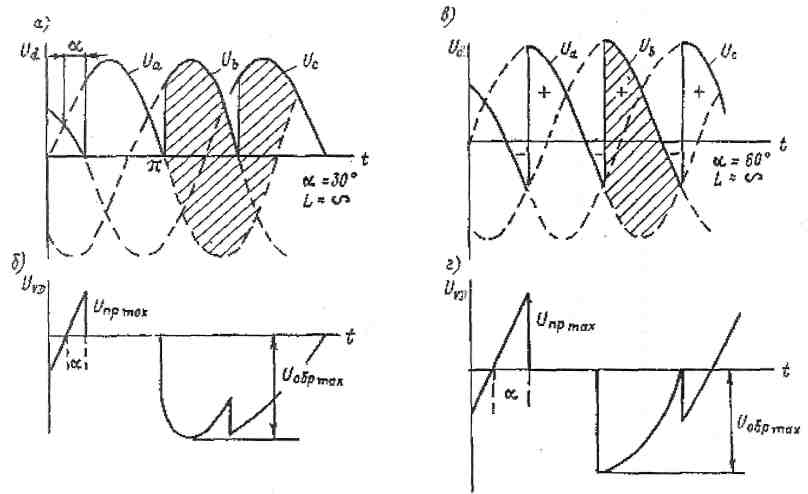


Рисунок 5.3. Диаграмма работы трехфазного нулевого УВ на индуктивную нагрузку

# ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

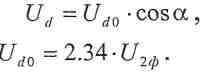
Такие УВ наиболее широко распространены в области средних и больших мощностей, что связано с их высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками. Вентили схемы (рисунке 6.1) образуют две группы: катодную *(VD1, VD3, VD5)* и анодную, и нагрузка оказывается подключенной к двум фазам вторичной обмотки трансформатора. Можно также считать, что нагрузка получает питание от двух последовательно включенных нулевых трехфазных схем выпрямления.

Особенностью схемы управления таким УВ является то, что она должна обеспечивать подачу сигналов управления при включении схемы, а также в некоторых других случаях — одновременно на два тиристора из разных групп. Приработа УВ на активную и индуктивную нагрузку одинакова

и полностью совпадает с режимом неуправляемого выпрямителя; при имеют место различия.

На рисунке 6. 2 показаны диаграммы работы трехфазного мостового УВ на активную нагрузку при. Как видно из диаграмм, при

кривыенепрерывны (уголотсчитывается от точки пересечения фазных напряжений). По мере увеличениязначения уменьшаются по закону



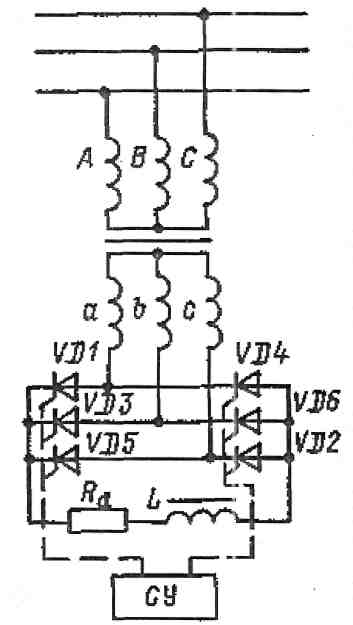


Рисунок 6.1 Трехфазный мостовой УВ

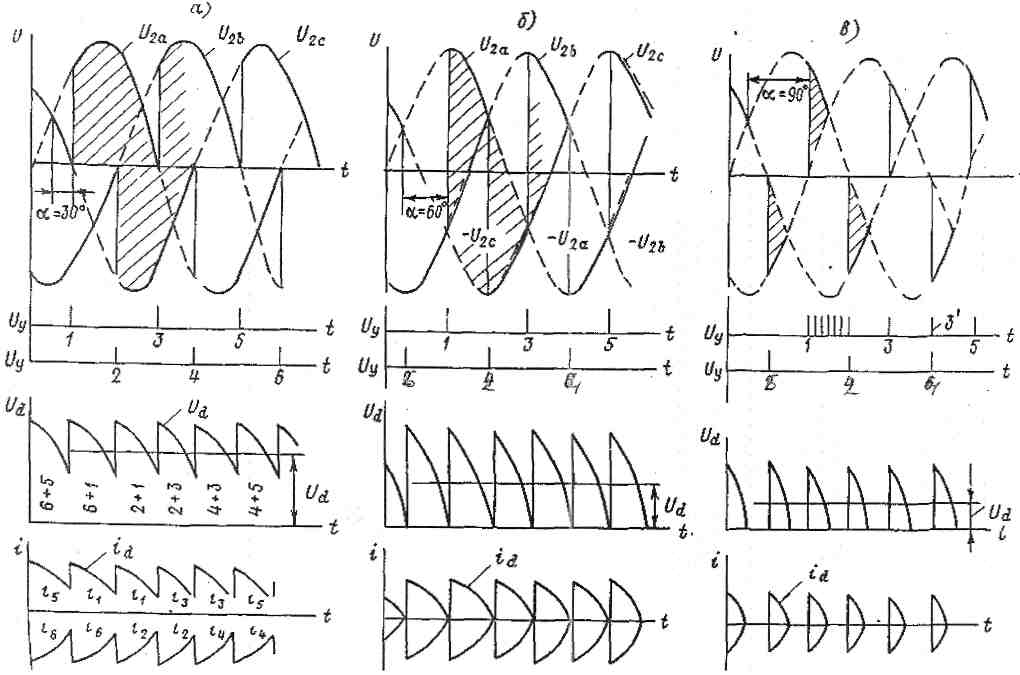


Рисунок 6.2 Диаграммы работы трехфазного мостового УВ на активную нагрузку при различных углах регулирования

Уголявляется критическим и при дальнейшем его увеличении в

кривыхипоявляются паузы, т. е. наступает режим работы УВ с прерывистым выпрямленным током (при активной нагрузке!). Для обеспечения этого режима на управляющие электроды тиристоров следует подавать либо сдвоенные импульсы с интервалом, либо удлиненные шириной не менее(показано на диаграмме для). Например, для

того чтобы открыть тиристор *VD1* в моменти обеспечить цепь тока, необходимо подать такой же сигнал на *VD6.* После того как разность мгновенных напряженийстанет равной нулю, оба тиристора

закроются, а в момент времени *t3* должен вступить в работу *VD2,* который откроется только при наличии повторного управляющего сигнала на *VD1* или при длительности его более

Для режима прерывистых токов



При работе трехфазного мостового УВ на индуктивную нагрузку режим работы существенно изменяется (рис. 6). Так, ток в нагрузке остается (при данном) неизменным, каждый тиристор работает 1/3 периода, но переход тока с одного тиристора на другой происходит не в момент равенства фазных напряжений, а со сдвигом на угол а.Токи во вторичных, a следовательно, и в первичных обмотках представляют собой прямоугольные импульсы длительностью 1/3 периода одного и столько же другого направления. Сигналы управления подаются на тиристоры в соответствии с графиком 6, б, но при запуске схемы необходимо выполнить условие одновременной подачи сигнала на оба тиристора. С увеличением уменьшаются средние значенияно припереходс кривой

одного линейного напряжения на кривую другого происходит в пределах положительной полярности участков этих линейных напряжений, поэтому кривыеи его среднее значение одинаковы при активной и индуктивной нагрузках.

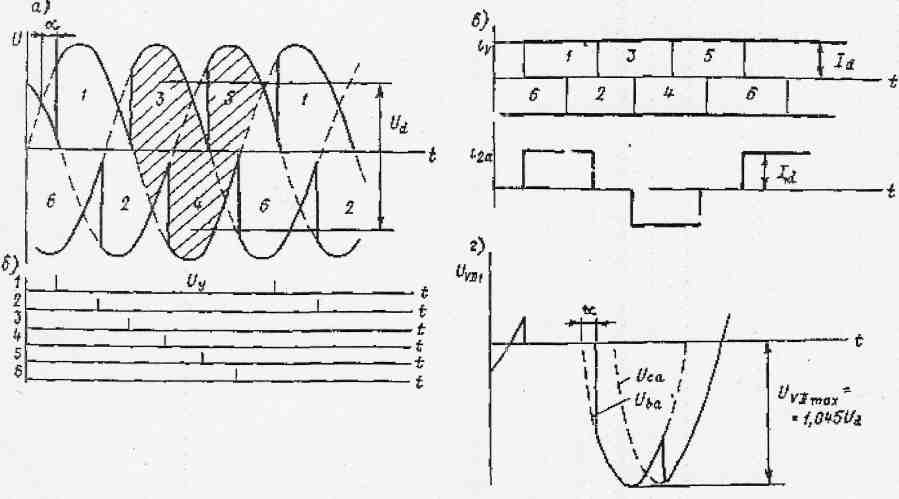


Рисунок 6.3 Диаграмма работы трехфазного мостового УВ на индуктивную нагрузку

При  в кривой(на рисунке 6.4, показаны кривые линейных

напряжений, так как именно они формируют напряжение на нагрузке) появляются участки с отрицательным напряжением, происходит более интенсивное снижениеПриэти площадки равны между собой и

 . Поэтому для индуктивной нагрузки, а регулировочная

характеристика трехфазной мостовой схемы имеет вид, показанный на рис. 8 (кривая а).

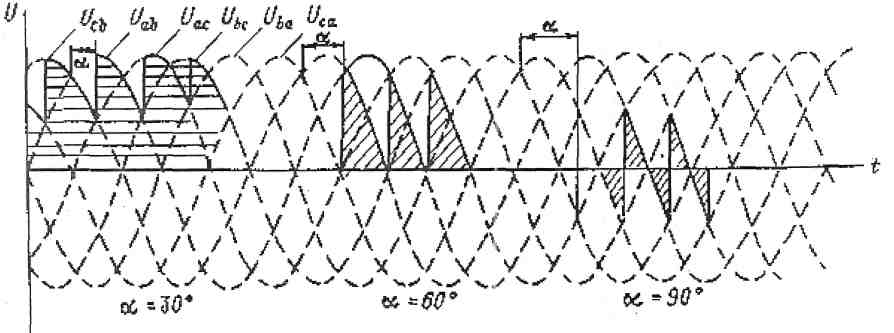


Рисунок 6.4 Диаграммы работы трехфазного мостового УВ при различных углах регулирования

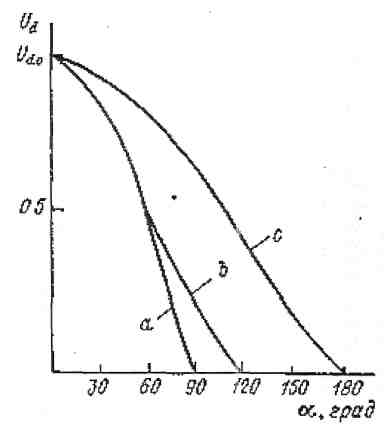


Рисунок 6.5 Регулировочные характеристики трехфазного УВ

На диаграмме (рис. 6, г) показан график изменения прямого и обратного напряжения на одном из вентилей. Эти напряжения не могут превышать, т.е. определяются линейным напряжением вторичной

обмотки трансформатора. Следует отметить, что в принципе данная схема может применяться без специального трансформатора, получая питание непосредственно от сети.

При работа схемы возможна, но уже в инверторном режиме,

когда происходит преобразование энергии источника постоянного тока,

# ИНВЕРТОРЫ, ВЕДОМЫЕ СЕТЬЮ

Как уже отмечалось, инвертированием называется процесс преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Если при этом приемная часть такого преобразователя (нагрузка) не имеет других источников питания, то инвертор называется автономным. Если же инвертор преобразует энергию постоянного тока и отдает ее в сеть, где есть другие источники, то он называется инвертором, ведомым сетью (ИВС), или просто ведомым.

ИВС выполняют практически по таким же схемам, что и управляемые выпрямители. На рисунке 7.1, а показана простейшая схема однофазного двухполупериодного ИВС. В качестве источника энергии используется обычная машина постоянного тока МПТ, которая может работать в режиме как двигателя, так и генератора.

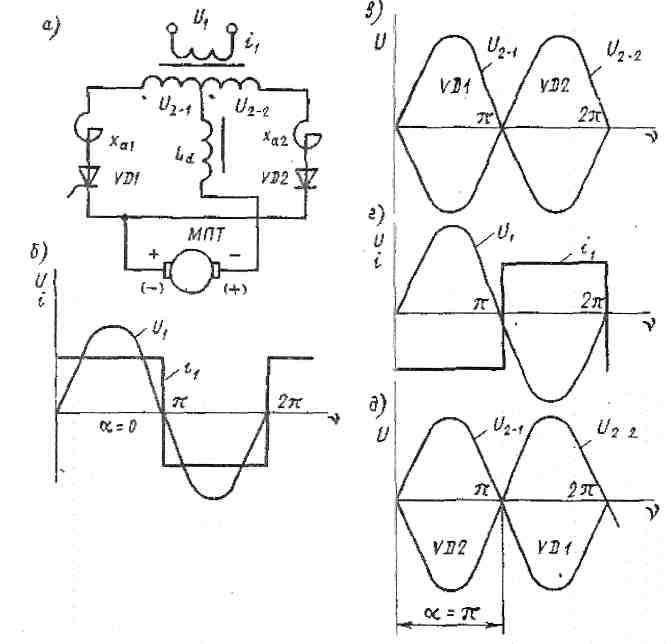


Рисунок 7.1 Однофазный ведомый инвертор (а) и диаграммы его работы (б-д)

Выходным звеном инвертора, работающего на сеть переменного тока, является трансформатор, параметры которого (количество обмоток и число витков) определяют значение и число фаз получаемого переменного напряжения. Для получения такого напряжения необходимо обеспечить периодический переход тока из одной обмотки в другую. Это достигается путем прерывания постоянного тока и распределения его по фазам трансформатора с помощью управляемых вентилей.

Чтобы изменить направление потока энергии, следует изменить знак мощности, развиваемой выпрямителем. Так как направление тока изменить нельзя вследствие односторонней проводимости тиристоров, то изменить знак *Pd* можно только изменением знака, что достигается в управляемом выпрямителе увеличением угла управления.

При выпрямлении источником энергии является сеть, поэтому при  кривая тока, потребляемого от сети, совпадает по фазе с напряжением питания(рисунке 7.1,б). Если, то форма токаблизка к прямоугольной, тиристор *VD1* работает в первом полупериоде, *VD2 -* во втором и машина работает в двигательном режиме (рис. 1, в, полярность на клеммах указана на рисунке 7.1, а).

При работе схемы в качестве инвертора источником питания служит машина постоянного тока, причем полярность на ее клеммах - обратная (на рис. 1, а в скобках). Изменение полярности источника постоянного тока -одно из обязательных условий перехода схемы в режим инвертирования. При этом фазовый сдвиг междусоставит(рис. 1,г), а тиристоры будут

работать в обратной последовательности: в первом полупериоде - *VD2,* во втором - *VD1* (рисунке 7.1, д).

Таким образом, тиристоры находятся в открытом состоянии при отрицательной полярности напряжений вторичных обмоток трансформатора, при этом осуществляются поочередное подключение обмоток трансформатора через дроссель к источнику постоянного тока и передача энергии в сеть.

Ранее проводивший тиристор запирается под действием обратного напряжения сети со стороны вторичных обмоток, отсюда и название инвертора - ведомый.

К ранее проводившему тиристору при отпирании очередного прикладывается обратное напряжение, равное сумме напряжений двух вторичных обмоток только в том случае, если очередной тиристор отпирается в момент, когда на подключенной к нему обмотке имеет место напряжение положительной полярности. Т. е. реальное значение угла *а* должно быть меньше *п* на некоторый угол , иначе говоря, или

 , или(рисунке 7.2).

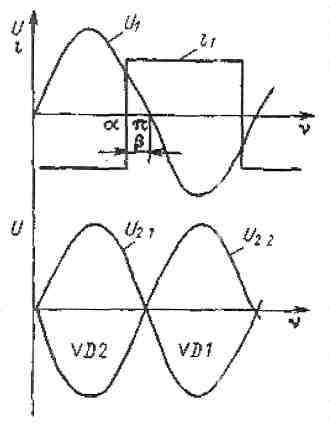


Рисунок 7.2. Диаграмма работы тиристора в ИВС

Если же очередной тиристор будет отпираться при, то условие

запирания ранее проводившего тиристора не будет выполнено, он останется открытым, будет создана цепь короткого замыкания источника постоянного тока через вторичные обмотки трансформатора и ИВС выйдет из строя. Такое явление называется опрокидыванием инвертора.

Таким образом, второе условие перехода схемы в режим инвертирования - протекание тока через тиристоры при отрицательном напряжении на обмотках.

Рассмотрим работу однофазного ИВС подробнее (рисунок 7.3). В схеме предполагается *L =* оо, поэтому входной ток инвертора идеально сглажен.

На интервале *0...а* проводит тиристор *VD2,* его анодный ток *ia2,*

равный *id,* протекает под действием ЭДС *Ed* источника постоянного тока (генератора) через вторичную обмотку трансформатора навстречу напряжению. Полуволна напряжения отрицательной полярности

определяет на этом интервале напряжениеинвертора. По окончании интервала *а*, т. е. с опережением на угол относительно точки , подачей управляющего сигнала отпирается тиристор *VD1.* Ввиду наличия индуктивностей и в анодных целях тиристоров наступает интервал коммутации *у* - период перехода тока с *VD2* на *VD1,* в течение которого  . По окончании этого интервала *VD2* заперт, *VD1* открыт и . На интервале от - угол, в течение которого к *VD2* приложено обратное напряжение для восстановления его запирающих свойств) до угла  ток от генератора протекает через другую половину вторичной обмотки трансформатора и *VD1.* Участок напряжения(отрицательной полярности) определяет *Ud* инвертора на этом интервале, и т. д.

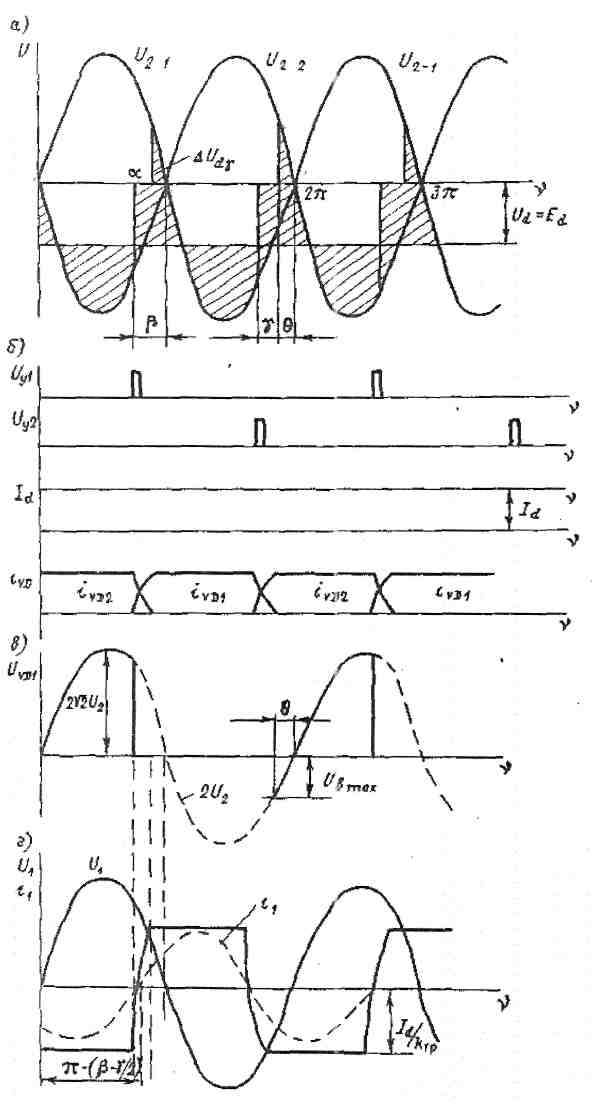


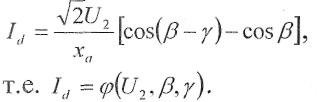
Рисунок 7.3. Диаграмма работы однофазного ИВС

Заштрихованные участки (рис. 3, а) определяют отрицательный знак напряжения, противоположный режиму выпрямления.

Кривая напряжения на тиристоре (рисунок7.3, в) определяется суммой напряжений на вторичных обмотках трансформатора: максимальное прямое напряжение равно, обратное - . Длительность действия обратного напряжения на тиристоре должна обеспечить надежное его запирание, т.е. . На рис. 3, г приведены кривые напряжения сети и отдаваемого в сеть тока амплитуда тока равна

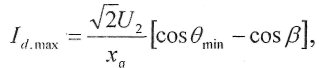


Так как коммутационные процессы в управляемом выпрямителе и ведомом инверторе сходны, то соотношения для периода коммутации в УВ можно использовать и в ИВС при условии подстановки. Тогда

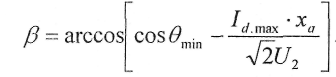


При неизменных угле опереженияи напряжениидля увеличения инвертируемого тока необходимо уменьшить разность  за счет роста угла коммутации, т. е. увеличение инвертируемого тока приводит к уменьшению времени действия запирающего напряжения на выключаемом вентиле. Таким образом, критерием выбора углаявляется обеспечение при

 необходимого угла, требуемого для надежного запирания тиристора с целью исключить опрокидывания инвертора. Тогда

 **(\*)**

или

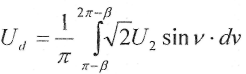


Если не учитывать активное сопротивление в цепи источника питания, то его ЭДС будет равна  причем последнее имеет, как видно,

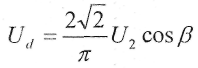
отрицательную полярность, а коммутационное падение напряжения

будет прибавляться к

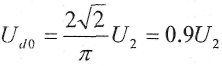
Если принять, то



Отсюда



или,

где

Иначе говоря, при  и замене  на  уравнение инвертора

аналогично уравнению УВ.

На рисунке 7.4 приведена обобщенная характеристика преобразователя, ведомого сетью, из которой видно, что в пределах угла регулирования  он работает в режиме управляемого выпрямителя, а при - в режиме ИВС.

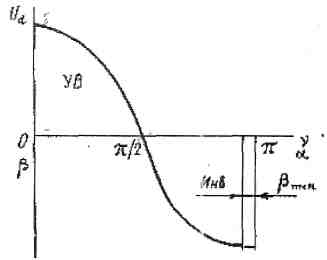
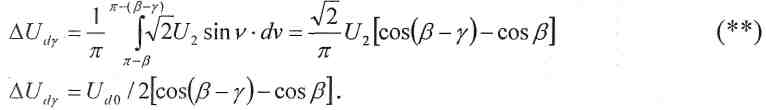


Рисунок 7.4. Обобщенная характеристика тиристорного преобразователя

Коммутационное падение напряжения  (за полупериод) можно



Так как



то после подстановки



вычислить так: • •

Так как в инверторе, то повышениеприводит к увеличению

 т. е. увеличивается мощность, отдаваемая инвертором в сеть.

Зависимость напряженияпитающего ИВС, от токаназывается входной характеристикой инвертора. Уравнение характеристики опре­деляется из уравнений (\*) и (\*\*):

Как видно, разница между входной характеристикой ИВС и внешней характеристикой УВ заключается в замене угла на угол  и в знаке коммутационного падения напряжения.

Входные характеристики ИВС приведены на рис. 5. Из него видно, что для каждого угла регулирование  с увеличениемрастетпричем при этом происходит уменьшение(времени, предоставляемого тиристорам для восстановления запирающих свойств). При достижении током некоторого значения уголстановится критическим. При дальнейшем увеличении тока происходит опрокидывание тиристора.

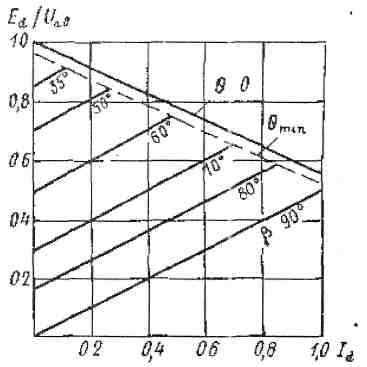
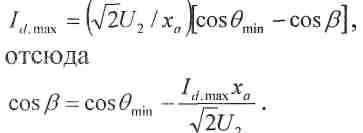


Рис. 5. Входные характеристики ИВС

Так как с уменьшениемдопускаемый ток ИВС уменьшается, то на том же графике можно построить так называемую ограничительную характеристику, соответствующую предельным значениям, при которых еще не происходит опрокидывания инвертора. Уравнение этой характеристики может быть получено следующим образом:



Подставив это выражение в уравнение входной характеристики ИВС, можно получить







Коэффициент мощности ИВС, где

и(критический режим)

При



Трехфазные инверторы применяются значительно чаще чем одно­фазные. Схема трехфазного ИВС подобна схеме Ларионова, только вместо нагрузки последовательно с дросселем включается источник постоянного тока, а выходной частью схемы служит первичная обмотка трансформатора, включенная на ведомую сеть. Характеристики и параметры трехфазного ИВС аналогичны рассмотренным.

# РЕВЕРСИВНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Во многих случаях в энергетических установках требуется получать в нагрузке напряжение постоянного тока различной полярности при питании ее от сети переменного тока, а часто необходимо обеспечить и возврат энергии в сеть. К таким установкам относятся в первую очередь электрические машины постоянного тока, работающие в системе электропривода грузоподъемных устройств (кранов, лебедок), а также гребные электрические установки переменно-постоянного тока с регулируемыми УВ. Для обеспечения указанных режимов применяются так называемые реверсивные УВ (РУВ), без каких-либо контактных переключателей.

Такие РУВ представляют собой два обычных, чаще всего трехфазных мостовых УВ, включаемых по одной из схем, приведенных на рис. 6.

Схема а - перекрестная, требует раздельного питания мостов от отдельных обмоток, поэтому используется реже. Схема б выполнена так, что оба УВ, включенные встречно-параллельно, получают питание от одной вторичной обмотки трансформатора или просто от сети. Реакторы *L1-L4* могут быть независимыми, а могут быть выполнены попарно на общих магнитопроводах.

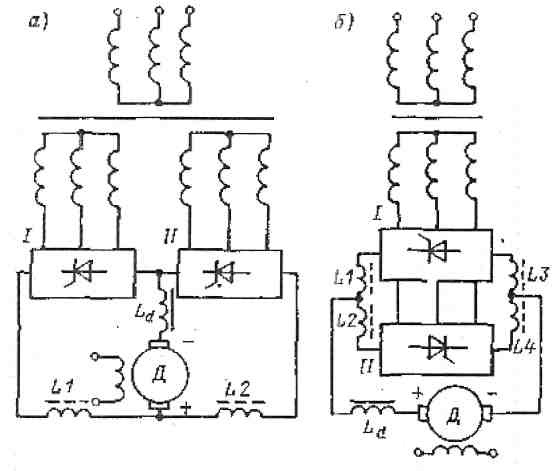


Рис. 6. Схемы реверсивных УВ

Различают два режима управления тиристорными группами РУВ -раздельное и совместное. При более простом, раздельном управлении тиристорные мосты работают по очереди. Например, чтобы обеспечить полярность напряжения на нагрузке, указанную на рис. 6, б, мост I работает в режиме выпрямителя, причем величина напряжения и, следовательно, частота вращения машины постоянного тока (МПТ) определяются углом регулирования(принапряжение максимально). При необходимости

затормозить и остановить МПТ мост I переводится в инверторный режим (), происходит отдача энергии от МПТ, работающей в режиме

генератора, в сеть, а когда МПТ останавливается и ее необходимо реверсировать, включается в работу мост *II* в выпрямительном режиме. После выключения одного моста перед включением другого необходимо обеспечить некоторую паузу, пока ток через тиристоры ранее работавшего моста не спадет до нуля и не произойдет надежное запирание тиристоров. Эта пауза (5 ... 20 мс) приводит к некоторому уменьшению быстродействия в переходных режимах электропривода, но для МПТ большой мощности это время практически неощутимо. Для контроля спадания токов в мостах до нуля в схемах предусматриваются специальные датчики тока, сигнал с которых заводится в схему управления. Реакторы между мостами в принципе не нужны, но для исключения режимов прерывистых токов, что неблагоприятно отражается на МПТ, в цепи ее якоря должна быть достаточно большая индуктивность.

При совместном управлении сигналы на управляющие электроды подаются на тиристоры обоих мостов, один из которых работает в режиме выпрямления, второй - в режиме инвертирования. Для предотвращения появления значительных уравнительных токов необходимо, чтобы средние значения напряжений выпрямителя и инвертора были бы равны, т. е.  , а для этого необходимо, чтобы

 , или ,

или

При  недоиспользуется мощность РУВ, а при

 возникают значительные уравнительные токи. Если в режиме выпрямления работает мост I, а в режиме инвертирования - мост *II,* то  , или

При изменении направления тока через нагрузку и изменении режимов работы мостов

Для пояснения процессов пуска, торможения и реверсирования двигателя постоянного тока, питающегося от РУВ, удобно рассмотреть совмещенные внешние характеристики такого преобразователя (рис. 7).

Если необходимо обеспечить пуск МПТ в сторону, определяемую полярностью, указанной на рис. 6, б, осуществляется подача управляющих сигналов на тиристоры моста I с углом , близким к . Двигатель начинает разгоняться до небольшой скорости, определяемой . Для

дальнейшего увеличения частоты вращения МПТ надо увеличивать, что производится уменьшением угла моста I. соответственно до значения  . При этом происходит переход рабочей точки с одной внешней характеристики на другую по линиям, показанным пунктиром, наклон которых зависит от темпа пуска МПТ и величины индуктивности в цепи якоря. Чтобы не допустить слишком больших токов (больше ),

необходимо ограничивать темп изменения . Если схема управления будет настроена на поддержание , то разгон двигателя будет идти

практически по линии  до достижения внешней характеристики УВ,

соответствующей заданному углу(например,), и далее двигатель будет работать в точке пересечения этой внешней характеристики и линии  если в схеме управления не предусмотрена дополнительная обратная связь, обеспечивающая  В этом режиме работает мост I,

мост *II* не используется.

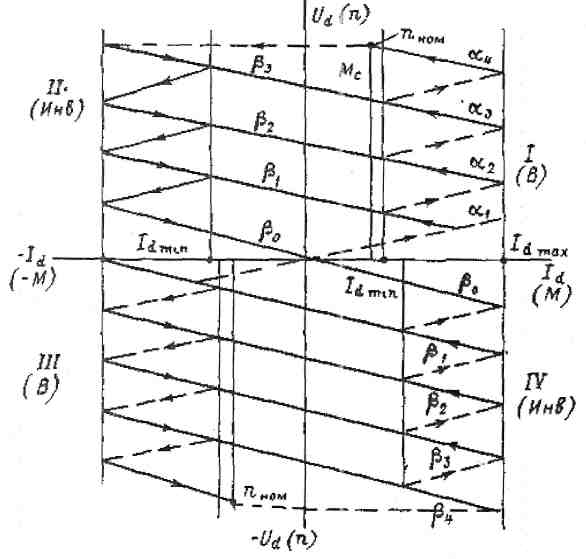


Рис. 7. Диаграмма работы РУВ на электропривод

При необходимости торможения двигателя угол  увеличивают,

например с до, что эквивалентно для моста II характеристике;• рабочая точка переходит во *II* квадрант, включается второй мост, отключается первый и дальнейшее торможение (с отдачей энергии в сеть) проводится изменением угладо, т. е. до полной остановки двигателя. Для получения максимальной скорости процесса торможения тормозной ток следует, регулируя угол, поддерживать на уровне, близком к. При

дальнейшем изменении угла регулирования второго моста  можно

обеспечить пуск МПТ в обратном направлении.

Диаграмма напряжений на мостах РУВ приведена на рис. 8. Реверсивный управляемый выпрямитель с совместным управлением мостов позволяет обеспечить высокие динамические качества электропривода постоянного тока, однако у него есть и два больших недостатка -повышенные требования к схемам управления мостов для точного обеспечения равенства , а также неизбежность появления

уравнительных токов между мостами. Эти токи возникают как следствие

неравенства мгновенных значений напряжений  и , создаваемых

мостами, работающими соответственно в выпрямительном и инверторном режимах (при равенстве средних значений). Если мост I работает как выпрямитель, а мост II - как инвертор, то приимеет место разность

напряжений (рис. 8, б). Уравнительный ток протекает по внутреннему контуру, образуемому открытыми тиристорами (в данный момент) и обмотками трансформатора. Так, на интервале  уравнительный ток

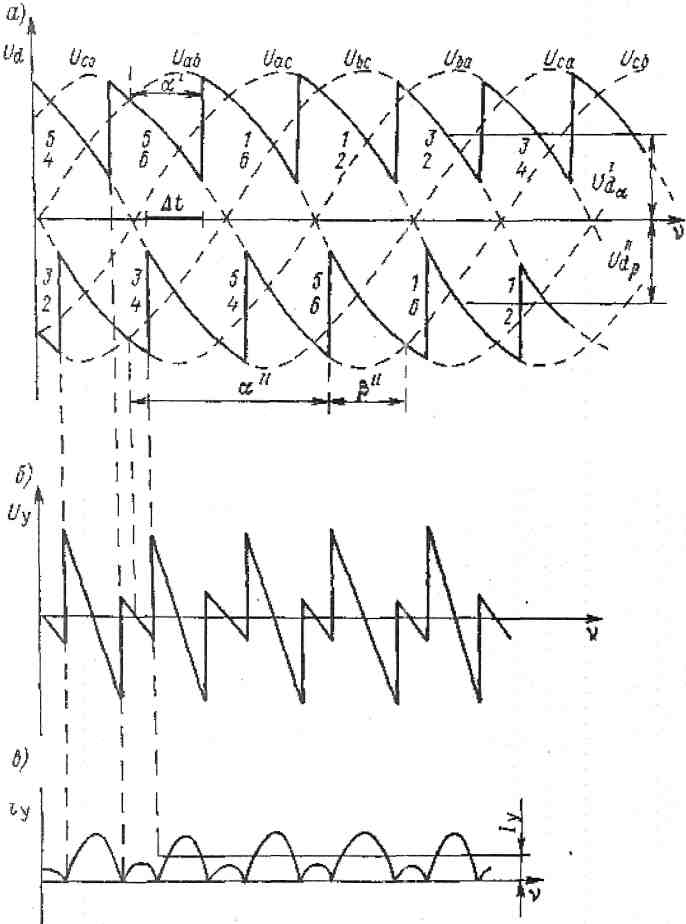


Рис. 8. Диаграмма напряжений на мостах РУВ

протекает через тиристоры 5 и 6 моста I и 4 и 5 ■ моста *II* (расположение диодов в мостах показано на рис. трехфазного мостового УВ). Так как сопротивления этих контуров очень невелики, для ограничения уравнительного тока необходимо применять специальные меры, например включать в цепь реакторы.

Индуктивность реакторов рассчитывают из условия ограничения уравнительных токов до уровня . Естественно, с применением

реакторов ухудшаются массогабаритные показатели РУВ, увеличиваются потери в вентилях и обмотках трансформатора, требуются дополнительные меры по охлаждению элементов схемы. Поэтому РУВ с совместным управлением следует использовать при создании быстродействующих, относительно малоинерционных приводов.

Необходимо иметь в виду, что уравнительные токи возникают и в РУВ, выполненном по перекрестной схеме, но так как частота этих токов в два раза больше, чем во встречно-параллельной схеме, то габариты реакторов соответственно меньше.

Для получения в нагрузке регулируемого напряжения постоянного тока любой полярности можно применять схему (рис. 9), включающую один трехфазный УВ с одной схемой управления, который может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режиме, и тиристорный переключатель полярности *VD7, VD10.* При включении *VD7* и *VD10* ток по нагрузке протекает слева направо, при включении *VD8* и *VD9 -* в обратном направлении.

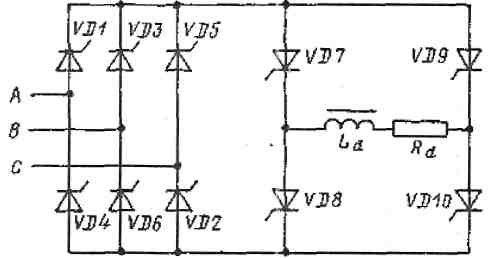


Рис. 9. РУВ с тиристорным переключателем полярности

Так как в схему управления этими тиристорами можно не включать устройства фазового управления, а предусмотреть только блокировку переключения при, то все устройство получается дешевле, проще и не

требует защиты от уравнительных токов. Но, как и в схеме с раздельным уп­равлением тиристорных мостов, в этой схеме следует учесть бестоковую паузу.

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

*Инвертором* называется устройство для преобразования постоянного тока в переменный с постоянными или регулируемыми значениями выходного напряжения и частоты. Если инвертор работает на нагрузку, не имеющую другого источника питания, он называется автономным. Автономные инверторы (АИ) применяются для питания потребителей переменным током от аккумуляторных батарей или других источников постоянного тока, для электропривода с частотным регулированием, в системах прямого преобразования энергии, например от топливных элементов, МГД-генераторов и т. п.

Основные требования к АИ: максимальный КПД преобразования, минимальные массогабаритные показатели и стоимость, возможность регулирования в достаточно широких пределах, обеспечение

заданной формы выходного напряжения, отсутствие срывов работы при перегрузке и на холостом ходу и т. п.

В качестве переключательных элементов в автономных инверторах нашли применение транзисторы, обычные и двухоперационные тиристоры. Первые используются в устройствах относительно небольшой мощности, последние наиболее удобны в АИ напряжения и в регулируемых инверторах. Обычные тиристоры иногда приходится применять в совокупности со схемами принудительной коммутации.

Все АИ могут быть подразделены на ряд видов. По схеме преобразования АИ различаются по количеству фаз, схеме питания и некоторым другим параметрам, о которых будет упомянуто ниже. По способу коммутации вентилей они могут быть следующими:

инверторы, полностью коммутируемые по управляющим цепям (на транзисторах и ДОТ);

инверторы с коммутирующими конденсаторами, подключенными параллельно нагрузке;

последовательные инверторы;

АИ с двухступенчатой коммутацией, позволяющие осуществлять регулирование выходного напряжения.

Однако наиболее существенно деление автономных инверторов на два типа - автономные инверторы напряжения (АИН) и АИ тока (АНТ) в зависимости от характера источника питания и его связи с АИ (кроме того, существуют и резонансные АИ, но применяются они редко).

Автономный **инвертор напряжения.**

АИН формирует в нагрузке переменное напряжение путем периодического подключения ее к источнику напряжения за счет поочередного попарного включения вентилей (рис. 1, а).

Источник питания работает в режиме генератора напряжения (аккумуляторные батарея или выпрямитель с емкостным фильтром),

назначение конденсатора будет разъяснено дополнительно.

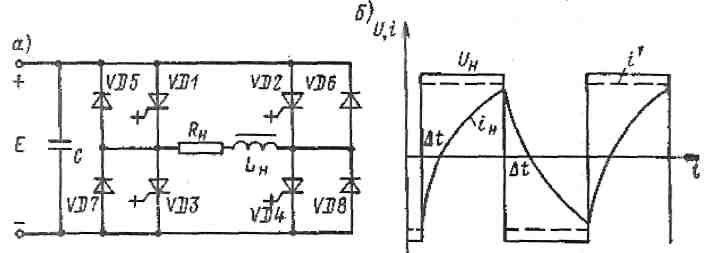


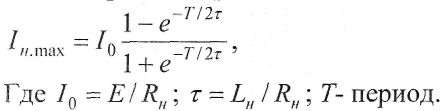
Рис. 1. Автономный инвертор напряжения (а) и диаграмма его работы (б)

Вентили должны быть полностью управляемые (ДОТ) или каждый тиристор снабжается схемой принудительной коммутации. При работе схемы на нагрузке формируются прямоугольные импульсы напряжения (рис. 1, б), а форма тока зависит от ее характера. Если нагрузка чисто активная, то форма тока совпадает с формой напряжения (пунктир на рис. 1, б), если нагрузка активно-индуктивная, токменяется по экспоненте с постоянной времени  . При запирании очередной пары вентилей (например, *VD1* и *VD4)*

и отпирании второй пары напряжениеменяется скачком, а ток некоторое времясохраняет свое направление. Для обеспечения прохождения этого тока используются так называемые обратные диоды *VD5... VD8,* далее ток замыкается через конденсатор *С.*

Частота тока в нагрузке определяется схемой управления, нагрузочная характеристика АИН - жесткая, так как напряжение на нагрузке практически равно

Tак как входной ток собственно инвертора становится (при *RL-*нагрузке) знакопеременным, то при работе АИН от выпрямителя необходим конденсатор *С* большой емкости. АИН могут работать в широком диапазоне нагрузок - от холостого хода до значения, при котором возможна перегрузка вентилей.

Максимальное значение тока нагрузки при симметричном характере выходногонапряжения равно

Регулировать напряжение на выходе АИН можно, либо изменяя *Е,* либо с помощью широтно-импульсного регулирования. Последнее осуществляют несколькими способами: 1) каждый импульс напряжения в нагрузке формируется из нескольких, меняющих свою длительность (рис. 2, а); 2) сокращение времени работы АИН в каждый полупериод за счет закрывания одной пары вентилей и включения второй пары с задержкой (рис.

2, б); 3) применение двух инверторов, работающих на общую нагрузку через трансформатор с геометрическим сложением выходных напряжений путем регулирования фазы в схемах управления (рис. 2, в). В первых двух случаях возрастают амплитуды высших гармоник, но в первом варианте можно по лучить выходное напряжение, близкое по форме к синусоидальному.

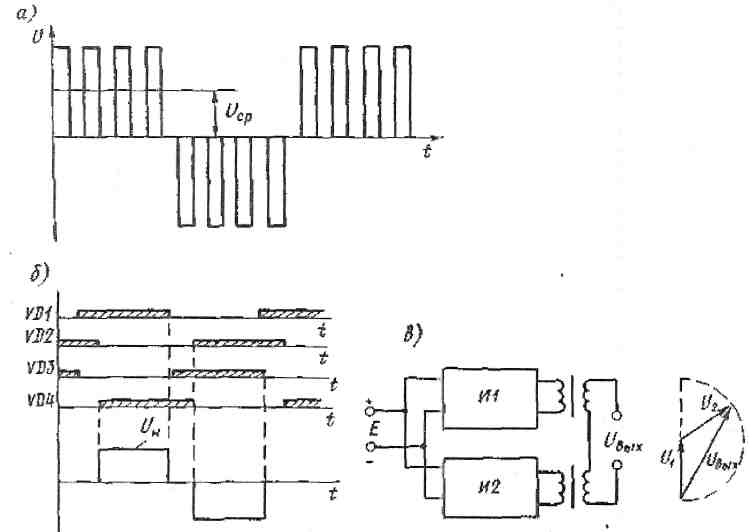


Рис. 2. Регулирование напряжения в АИН

Автономный инвертор тока.

АИТ (рис. 3) получает питание от источника питания через достаточно большую индуктивность, поэтому потребляемый инвертором ток практически не меняется. При поочередном переключении пар тиристоров (не запираемых) в нагрузке формируются прямоугольные импульсы тока, а форма напряжения зависит от характера нагрузки, которая, как правило, бывает активно-емкостная. По способу подключения конденсатора к нагрузке такие АИТ получили название праллельных

Как видно из рис. 3, при очередном переключении пар тиристоров (например, работали *VD1* и *VD4,* а включаются схемой управления *VD2* и *VD3)* через нагрузку ток меняется скачком, а за счет перезаряда конденсатора *С* в течение некоторого интервала времени ранее работавшие тиристоры оказываются под обратным напряжением и, естественно, запираются. Необходимо, чтобы этот интервал был больше времени выключения тиристора. Чем больше постоянная времени , тем медленнее

меняется напряжение на нагрузке, закон его изменения приближается к линейному, а форма - к треугольной. Внешняя характеристика АИТ -

мягкая (крутопадающая), режим холостого хода невозможен.

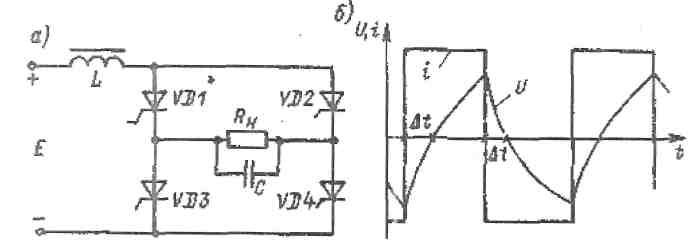
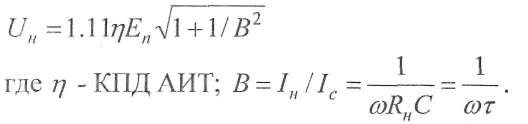


Рис. 3. Автономный инвертор тока (а) и диаграмма его работы (б)

Относительное значение напряжения на нагрузке и вид внешней характеристикимогут быть приближенно найдены из формулы

Следует отметить, что при активно-индуктивной нагрузке АИТ неработоспособен и такую нагрузку необходимо шунтировать конденсатором.

Так как на практике трудно обеспечитьдля АИТ или С = со С для

АИН, реальные схемы имеют некоторые промежуточные качества.

Для питания относительно маломощной однофазной нагрузки с напряжением, заметно отличающимся от напряжения питания, удобно применять схему, в которой одна пара тиристоров заменена полуобмотками трансформатора, а сам он позволяет согласовать(рис. 4).

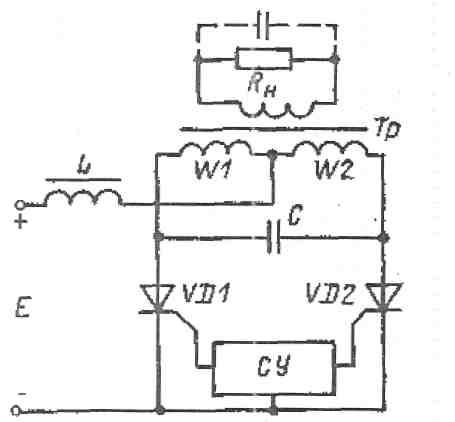


Рис. 4. Параллельный инвертор на тиристорах

При включении, например, *VD1* ток проходит от источника питания через *L,* полуобмотку *W1* трансформатора *Тр* и *VD1.* Во вторичной обмотке

индуцируется ЭДС, и появляется ток в нагрузке. Коммутирующий конденсатор С заряжается почти до удвоенного напряжения сети (за счет ЭДС самоиндукции в обмотке W2*.* Когда схема управления СУ включит *VD2,* конденсатор оказывается включенным параллельно *VD1,* тот мгновенно запирается (так как подано напряжение в запирающем направлении) и процесс повторяется.

В нагрузке формируется напряжение с частотой, определяемой схемой управления. Форма напряжения зависит от(при большихона ближе к треугольной, при меньших  - к прямоугольной), величина - от *Е,*

коэффициента трансформации и значения

Напряжение на *L* равно разности между(пересчитанным к половине первичной обмотки) и *Е.* В режимах, близких к холостому ходу, конденсатор заряжается неизменным током, причемможет достигать больших (много больше *Е)* значений, что опасно для тиристоров.

В качестве схемы управления можно применять транзисторный симметричный мультивибратор с эмиттерными повторителями, подключенными к управляющим электродам тиристоров, питающийся от того же источника питания. Схема пригодна для

 **Гц**

Последовательные инверторы в некоторых случаях применяются для получения переменного тока повышенной частоты (кГц). Они имеют

резонансную цепочку, с помощью которой производится коммутация вентилей. Схема работает следующим образом (рис. 5). При подаче управляющего сигнала открывается *VD1,* ток идет через  С. В

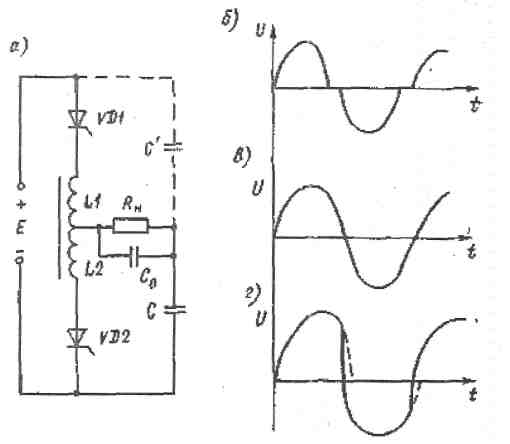


Рис. 5. Последовательный инвертор (а) и режимы его работы (б-г)

следующий полупериод включается *VD2* и конденсатор *С,* заряженный во время первого полупериода, разряжается через*L2* и *VD2.* Схема может работать в нескольких режимах.

В режиме прерывистых токов (рис. 5, б) *VD1* выключается после спадания тока заряда конденсатора *С,* т. е. до того момента, когда схема управления включает *VD2* (и наоборот). В результате имеет место интервал времени, когда оба вентиля ток не проводят и

В режиме непрерывных токов (рис. 5, г) *VD1* выключается в момент включения *VD2,* т. е. есть состояние, когда ток проводят оба вентиля. Выключение *VD1* при этом осуществляется за счет того, что при включении *VD2* и прохождении тока разряда *С* через *L2* в L1формируется противо-ЭДС, достаточная для снижения тока открытого *VD1* до нуля. Для этого необходимо, чтобы включение *VD2* происходило тогда, когда ток через *VD1* уже начал снижаться. В противном случае неизбежен режим „сквозного" тока через *VD1,L1, L2* и *VD2,* т. е. режим КЗ.

Оптимальным является граничный режим (рис. 5, в), при котором форма тока в нагрузке близка к синусоиде. Такие инверторы целесообразно применять при постоянных значениях всех параметров, в том числе нагрузки, при этом обеспечивается достаточно жесткая внешняя характеристика. Так как при малых нагрузках инвертор может выпасть из режима, параллельно включаюти инвертор превращается в последовательно-параллельный.

Если подключить еще один конденсатор  то инвертор из

однотактного превращается в двухтактный, в то время, когда заряжает разряжаетсяи наоборот. Это повышает эффективность работы схемы.

Последовательные инверторы могут быть и многофазными.

УЗЛЫ ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИИ

В качестве узлов принудительной (искусственной) коммутации тиристоров в автономных инверторах, переключателях переменного тока и других преобразователях используются переключатели постоянного тока на тиристорах. Такие переключатели могут использоваться самостоятельно, например в импульсных преобразователях постоянного напряжения. Если есть возможность применить двухоперационные тиристоры, то задача решается очень просто: достаточно в схеме управления сформировать сигнал обратной по отношению к включающему полярности, и тиристор будет выключен. Однако параметры и диапазон мощностей имеющихся в настоящее время ДОТ ограничивают их применение. Поэтому чаще приходится использовать обычные тиристоры.

Самый простой способ выключения такого тиристора - уменьшение (тем или иным способом) тока, проходящего через него, до значения, меньшего тока выключения (порядка ), и сохранение этого

состояния в течение времени выключения (единицы и десятки микросекунд). Если питание схемы осуществляется переменным током, то это происходит естественным путем после изменения полярности приложенного к тиристору напряжения и прекращения протекающего через него тока. При питании схемы постоянным током, что встречается довольно часто, для запирания тиристора необходимо на какой-то период времени приложить к нему обратное напряжение или полученное от постоянного источника, или сформированное с помощью специальной схемы от основного источника питания. Такая схема обычно называется схемой искусственной коммутации (ИК) и включает 4 ... 6 дополнительных элементов.

Схем ИК к настоящему времени разработано много. Иногда их делят на параллельные и последовательные по способу подключения основного узла схемы - конденсатора - к коммутируемому тиристору. Но основное их различие заключается в следующем. В некоторых схемах время включенного , состояния коммутируемого тиристора определяется параметрами схемы ИК и может быть изменено только изменением этих элементов. Но существуют схемы, в которых этот интервал зависит от момента подачи выключающего сигнала и может быть практически любым. Первая группа схем используется сравнительно редко (из-за трудности изменения емкости или индуктивности) и только в устройствах с частотно-импульсной модуляцией, когда длительность интервала проводимости тиристора постоянна, а регулируется частота их следования.

В схеме 1, а после включения тиристора *VD* возникает колебательный процесс в последовательном ZC-контуре. После заряда конденсатора ток в цепи спадает практически до нуля, тиристор закрывается, а конденсатор разряжается через сопротивление *R* для подготовки к следующему циклу. В схеме необходимо обеспечить два условия: ток, проходящий через, *VD, L* и *R,* должен быть меньше тока отпускания тиристора, т. е. *R* достаточно

велико, время включенного состояния тиристора определяется временем заряда конденсатора С черези *L.*

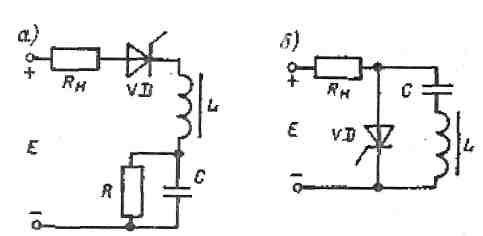


Рис. 1. Схемы выключения тиристора с помощью резонансных цепочек

В схеме 1, б используется последовательный колебательный контур, включенный параллельно тиристору. При запертом *VD* конденсатор заряжается до напряжения сети череза при включении *VD* происходит

колебательный перезаряд С. Через полпериода собственных колебаний *LC-*контура полярность конденсатора меняется на противоположную, и в сле­дующий полупериод нарастающий ток перезаряда конденсатора, протекая навстречу току через тиристор, выключает его (если ток контура превышает ), а затем снова *С* зарядится до



Более сложными, но зато более гибкими в работе являются схемы с произвольно регулируемым временем включения основного тиристора (рис. 2).

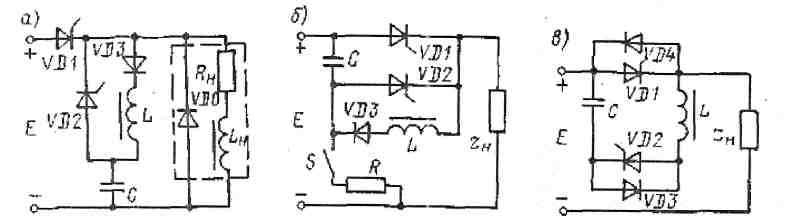


Рис. 2. Схемы выключения тиристора с помощью вспомогательного

тиристора

На рис. 2, а показана схема с коммутирующим конденсатором С, подключенным параллельно нагрузке. При включении основного тиристора *VD1* подается напряжение к нагрузке и через диод *VD3* и индуктивность *L* конденсатор С заряжается до напряженияЧерез *VD1* протекает сумма

тока нагрузки и тока заряда С, последний по форме близок к половине синусоиды. Если конденсатор *С* имеет малый ток утечки (условие обязательное и для прочих схем), то длительность включенного состояния *VD1* не ограничена. Для его выключения необходимо включить вспомогательный тиристор *VD2,* тогда к нагрузке будет подключен конденсатор *С,* а так как то тиристор *VD1* закроется, оказавшись под

обратным напряжением. После разряда *С* через нагрузку и *VD2* и спадания

тока в этой цепи до нуля *VD2* закроется, и схема будет готова к следующему циклу. К недостаткам схемы можно отнести то, что к нагрузке кратковременно прикладывается напряжение, превышающее *Е,* а это не всегда желательно, и быстрый разряд С через относительно малое сопротивление нагрузки, а следовательно, очень короткий промежуток времени (когда) для отключения *VD1.*

Более совершенной является схема на рис. 2, б. Перед началом работы необходимо обеспечить заряд конденсатора *С,* что производится включением *VD2.* Ток проходит по цепи *C-VD2-R„,* и конденсатор заряжается до напряжения сети. Второй, реже применяемый способ - заряд С через *R* при помощи ключа *S,* который должен быть кратковременно замкнут; этот способ используется иногда при первоначальном пуске схемы. При включении основного тиристора *VD1* ток поступает к нагрузке, одновременно конденсатор перезаряжается по цепи *VD1-L-VD3.* За счет индуктивности напряжение на нем к концу колебательного процесса становится больше *Е* и обратной полярности. В таком состоянии схема может находиться достаточно долго. Для выключения *VD1* необходимо включить *VD2,* тогда заряженный конденсатор *С* подключается параллельно *VD1* с обратной для последнего полярностью. *VD1* выключается, а конденсатор перезаряжается до исходного состояния (плюс на верхней обкладке) через. В этой схеме время нахождения *VD1* под обратным напряжением определяется временем спадания *Uc* до нуля, т. е. может быть использована меньшая емкость. Напряжение на нагрузке несколько превышает *Е,* но за время перезаряда конденсатора весь ток нагрузки проходит через *VD2,* и тиристор должен быть достаточно мощным, чтобы выдерживал этот ток. Схема имеет ряд достоинств, уже отмеченных ранее кроме того, параметры индуктивности у нее не очень критичны.

В схеме на рис. 2, в при подаче напряжения питания *Е* конденсатор *С* заряжается до этого напряжения через *VD3, L* и *RH* (ток заряда может быть достаточно малым). После включения основного тиристора *VD1* и подачи питания к нагрузке конденсатор остается в том же состоянии. Для выключения *VD1* включается *VD2,* тогда конденсатор С перезаряжается по цени *VD1-L-VD2,* и за счет индуктивности напряжение на нем (плюс на нижней обкладке) становится больше *Е, VD1* оказывается под обратным напряжением и закрывается с некоторой задержкой относительно момента отпирания *VD2,* что является недостатком схемы. Конденсатор С снова заряжается. Для быстрейшего восстановления исходного состояния схемы в нее может быть введен диод *VD4,* через который перезаряд конденсатора будет происходить быстрее, при сохранении на *VD1* обратного напряжения, равногона *VD4.*

Схемы выключения тиристора шунтированием ключом или тран­зистором (непосредственным или с применением специального источника питания) имеют принципиальные недостатки, не дающие возможности использовать их на практике.

Для более полного понимания процессов коммутации в переключателе постоянного тока на рис. 3 показано изменение токов и напряжений в основных контурах и точках схемы (см. рис. 2, б). Предполагается, что нагрузка либо активная, либо *RL* с обратным диодом. К нагрузке кратковременно прикладывается напряжение, большее *Е.* При индуктивном характере нагрузки напряжение конденсатора восстанавливается по линейному закону, если ток заряда равен току нагрузки, который практически в этом случае неизменен.

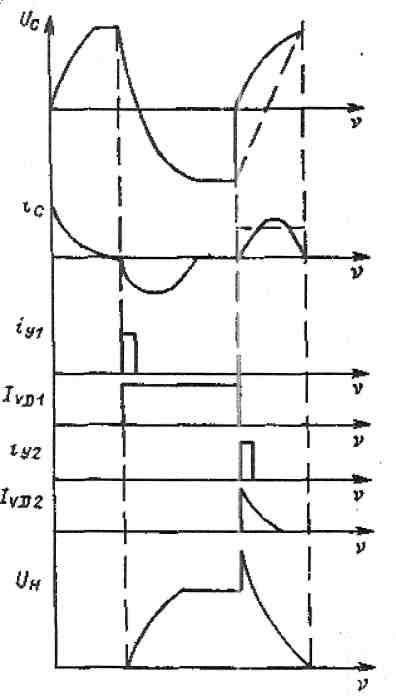


Рис. 3. Диаграмма работы тиристорного переключателя постоянного т