

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Баламирзоев Назим Лиодинович
Должность: И.о. ректора
Дата подписания: 21.08.2023 14:20:03
Уникальный программный ключ:
2a04bb882d7edb7f479cb266eb4aaaaedebee849

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»**



Кафедра теоретической и общей электротехники

**Курс лекций по дисциплине «Полупроводниковое преобразование
энергии» для студентов направления подготовки магистров 13.04.02
«Электроэнергетика и электротехника»**

Махачкала 2021

Курс лекций по дисциплине «Полупроводниковое преобразование энергии» для студентов направления подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». - Махачкала, ИПЦ ДГТУ, 2021 г. –122 с.

Курс лекций подготовлен на кафедре «Теоретической и общей электротехники» и предназначены для студентов направления подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплины «Полупроводниковое преобразование энергии».

В курсе лекций рассмотрены элементы силовой электроники и приведены схемы выпрямителей, преобразователей постоянного и переменного напряжений, ведомых и автономных инверторов, преобразователей частоты, термоэлектрических генераторов и других устройств преобразовательной техники. Выполнен анализ процессов, приведены элементы расчета и характеристики схем. Большое внимание уделено энергетическим показателям.

Составители:

Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТиОЭ ФГБОУ ВО «ДГТУ»
Евдулов Д.В., к.т.н., ст. преподаватель кафедры ТиОЭ ФГБОУ ВО «ДГТУ»
Евдулов О.В., к.т.н., доцент кафедры ТиОЭ ФГБОУ ВО «ДГТУ»

Рецензенты:

1. Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор кафедры ТиОЭ ФГБОУ ВО ДГТУ;
2. Кобзаренко Д.Н., д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории комплексного освоения возобновляемых источников энергии Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики филиала- ФГБУН ОИВТ РАН.

Печатается согласно постановлению Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» от _____ 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость применения преобразователей электрической энергии обусловлена свойствами потребителей электрической энергии к которым относятся двигатели постоянного и переменного тока, электролизные установки, электродуговые печи, всевозможные нагревательные элементы, тяговые подстанции и т.д. Для регулирования координат электродвигателей (скорости, тока и момента) необходимо изменять подводимое к двигателю напряжение по определенному закону или изменять одновременно амплитуду и частоту подводимого к двигателю переменного напряжения. Силовые полупроводниковые преобразователи энергии позволяют преобразовывать переменное напряжение промышленной частоты в регулируемое постоянное напряжение, а также в переменное напряжение регулируемой частоты и амплитуды.

Основными преимуществами полупроводниковых преобразователей по сравнению с другими видами преобразователей (например электромашинными) являются:

- высокий КПД;
- высокое быстродействие;
- малые габариты и масса;
- низкая стоимость;
- малая мощность управления;
- меньшая трудоемкость при изготовлении и эксплуатации;

Выпускаются силовые полупроводниковые преобразователи малых, средних и больших мощностей. Преобразователи используются в регулируемом электроприводе промышленных установок в металлургии, машиностроении и легкой промышленности для питания электродвигателей подъемников, лифтов и кранов, для тяговых подстанций на электрифицированном железнодорожном транспорте, в установках электрического нагрева и электролиза. Также областями применения преобразователей являются системы автоматики, бортовые системы электропитания, средства связи и т.д.

Глава 1. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ – ОСНОВНОЙ СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1.1. Предмет преобразовательной техники

Полупроводниковая преобразовательная техника является одним из разделов промышленной электроники.

Энергетическая электроника, силовая электроника – все это синонимы термина преобразовательная техника (ПТ), но, пожалуй, более точно отражающие ее смысл. Например, по-английски соответствующий термин

«*power electronics*», по-немецки – «*Leistung Elektronik*», что точно переводится, как мощная электроника.

Термин «Преобразовательная техника» охватывает и другие виды преобразования электрической энергии. Преобразование электрической энергии может осуществляться, как электромеханическими (динамическими), например, электромашинными преобразователями, так и электронными (статическими) преобразователями.

Поэтому с учетом, применяемых в настоящее время полупроводниковых приборов, более точное название курса «Полупроводниковая преобразовательная техника».

Энергетическая электроника – это сильноточная ветвь промышленной электроники. Энергетическая электроника начала свою историю в начале XX века после создания электронного диода, а затем ртутного вентиля, но подлинное ее развитие и широкое внедрение связано с появлением полупроводниковых приборов.

Преобразователи электрической энергии являются основным предметом изучения энергетической электроники. Преобразовательная техника изучает вопросы преобразования электрической энергии. Преобразование электрической энергии – это изменение ее параметров (напряжения, числа фаз, частоты, включая нулевую, то есть постоянный ток), а также улучшение качества электроэнергии, изменение формы напряжения и т.д.

С помощью устройств преобразовательной техники более 50% вырабатываемой электроэнергии преобразовывается в другие виды. Поэтому особенно велика роль устройств преобразовательной техники в деле энергосбережения.

Преобразовательная техника является основой современного электропривода и находит в нем все более широкое применение. Полупроводниковые преобразователи энергии применяются на транспорте, в электротехнологичных установках, на электростанциях. Устройства преобразовательной техники являются основой бытовой электроники. Современные источники питания телевизоров, радиоприемников,

компьютеров неосуществимы без применения устройств преобразовательной техники.

Широкое применение устройств преобразовательной техники обусловлено **преимуществами полупроводниковых приборов** и элементов микроэлектроники – малыми габаритами, быстродействием, чувствительностью, надежностью, экономичностью и широкими возможностями преобразования информации.

Поэтому изучение преобразовательной техники невозможно без знания полупроводниковых приборов и элементов микроэлектроники.

Энергетическая электроника (преобразовательная техника) изучает методы преобразования электрической энергии и устройства, реализующие эти методы. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии предназначены для **преобразования параметров электрической энергии** (напряжения, частоты, числа фаз, формы напряжения и тока). Современная преобразовательная техника основана на применении полупроводниковых приборов.

В полупроводниковой преобразовательной технике используются диоды, тиристоры и транзисторы в ключевом режиме. Приборы, работающие в ключевом режиме (открыт, закрыт), называются **вентильями**. Преобразователи, выполненные на вентильях, называются **вентильными преобразователями**.

Изучение курса «Полупроводниковое преобразование энергии» базируется на знании курсов: «Физика», «Теоретические основы электротехники», «Физические основы электроники» и «Электрические машины».

Язык преобразовательной техники базируется на трех «китах»: схемах, временных диаграммах и характеристиках.

1.2. Назначение и классификация устройств преобразовательной техники

Основное применение вентильные преобразователи нашли в качестве источников питания различных устройств. **Современный электропривод не мыслим без вентильных преобразователей**. В нем органически сливаются электрическая машина, вентильный преобразователь и устройство управления. Вентильные преобразователи классифицируются по ряду признаков.

Классификация вентильных преобразователей представлена на рис. 1.1.

1. По связи с сетью вентильные преобразователи делятся на преобразователи:

а) **ведомые сетью**, в которых процессы происходят синхронно с частотой сети;

б) **автономные**, которые либо не связаны с сетью, либо не зависят от частоты сети.

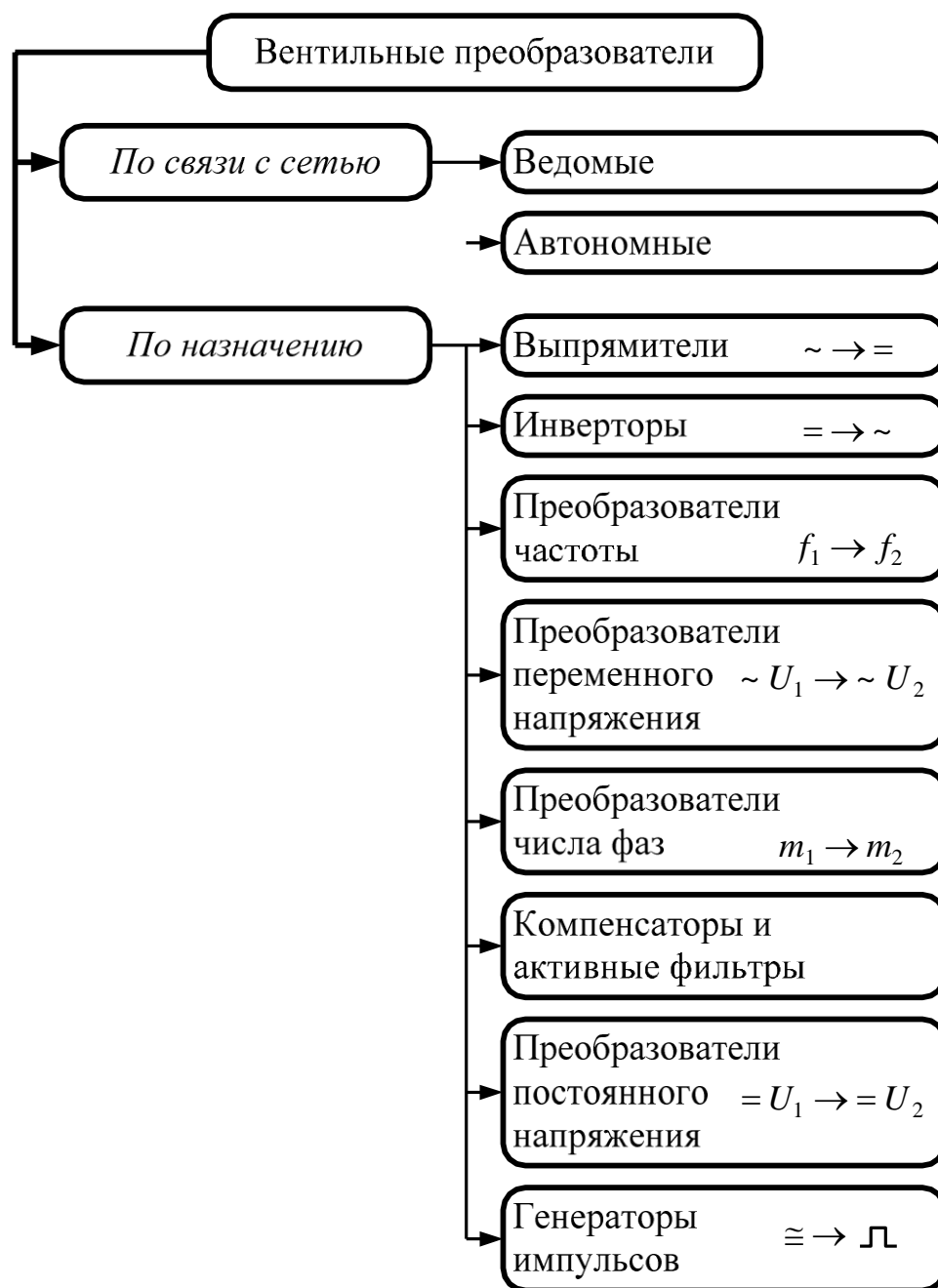


Рис. 1.1. Классификация вентильных преобразователей

2. По назначению вентильные преобразователи делятся:

а) на **выпрямители**, которые преобразуют переменный ток в постоянный ток;

б) на **инверторы**, которые преобразуют постоянный ток в переменный ток;

в) на **преобразователи частоты**, которые преобразуют переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты;

г) на **преобразователи переменного напряжения**, изменяющие величину переменного напряжения. При этом частота и число фаз остаются неизменными;

д) на **преобразователи числа фаз**, изменяющие число фаз при неизменной частоте;

е) на **компенсаторы и активные фильтры**, которые повышают качество напряжения в сети;

ж) на **преобразователи постоянного напряжения**, изменяющие величину постоянного напряжения;

з) на **генераторы импульсов**, формирующие импульсы произвольной формы и частоты.

1.3. Состав устройств преобразовательной техники

Все устройства преобразовательной техники состоят из **силовой части** и **системы управления**, что показано на рис. 1.2.

Элементами силовой части являются:

- вентили;
- трансформаторы;
- реакторы;
- конденсаторы.

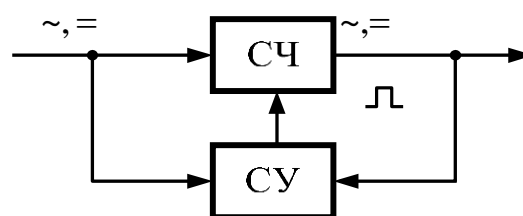


Рис. 1.2. Состав устройства преобразовательной техники (СЧ – силовая часть; СУ – система управления)

Система управления может быть аналоговой, цифровой или комбинированной.

В данном курсе основное внимание уделяется силовым схемам и алгоритмам управления. Сами системы управления будут подробнее рассмотрены в последующих курсах.

1.4. История и перспективы развития устройств преобразовательной техники

Современные отрасли электротехники – электропривод, электроснабжение, электротехнологию и бытовую электротехнику нельзя представить без преобразовательной техники. Кратко рассмотрим основные этапы ее развития. **Энергетическая электроника** – очень молодая наука. Ее история насчитывает немногим более ста лет. Появление электроники было вызвано потребностями радиотехники. В первом радиоприемнике А.С. Попова в 1895 году использовалось

устройство для детектирования (выпрямления) сигналов переменного тока – когерер. По существу это был полупроводниковый прибор, в котором выпрямление происходило на границе окисла и металла. Конечно, теория этих процессов была создана гораздо позже.

Развитие энергетической электроники определялось развитием **электронных приборов**. В 1904 г. англичанин Джон Флеминг изобрел **электронный диод**. Его создание было основано на предшествующих работах Томаса Эдисона, открывшего термоэлектронную эмиссию, и Лодыгина, создавшего лампу накаливания.

В начале 1900-х годов в США Купером Юитом были разработаны стеклянные **ртутные выпрямители**, ставшие по существу родоначальниками силовых приборов для энергетической электроники. Стеклянные ртутные выпрямители разрабатывались в СССР сразу после октябрьской революции под руководством академика В.П. Вологодина. Первый металлический ртутный выпрямитель появился в Германии в 1911 г. Его создатель – инженер Б. Шеффер. Выпуск металлических ртутных выпрямителей в СССР был начат в 1924 г. под руководством В.К. Крапивина.

В середине 20-х годов начался выпуск первых полупроводниковых выпрямителей – выполненных в виде последовательно соединенных медных пластин, покрытых окисью меди. Развитие полупроводниковой техники сдерживалось из-за отставания теории, а также отсутствия технологий.

Год рождения **транзистора** – 1948. За это изобретение его создатели Уолтер Браттейн, Джон Бардин и Вильям Шокли были удостоены Нобелевской премии. Этот транзистор был биполярным. Работы по созданию полевого транзистора велись длительное время, но только в 1958 г. польскому ученому Станиславу Тешнеру, работавшему во Франции, удалось создать прибор, пригодный для практического применения.

В 1958 г. фирмой *Westinghouse* были разработаны **тиристоры** – мощные полупроводниковые приборы, пришедшие на смену управляемым ртутным выпрямителям и совершившие подлинную революцию в управляемом электроприводе и электротехнологии. Достаточно сказать, что ртутный вентиль на 1000 А имел массу 300 кг, а тиристор на тот же ток вместе с охладителем – всего 5 кг. В СССР тиристоры начали выпускаться уже в 1961 г. Симметричные тиристоры появились в СССР на несколько месяцев раньше, чем за рубежом. Под руководством И.В. Грехова в РФ разработаны полупроводниковые генераторы мощных наносекундных импульсов. В СССР появились первые работы по применению тиристоров на ультразвуковых частотах. 90-е годы ознаменовались изобретением Ниидзавой (фирма «Тошиба», Япония) **IGBT-транзистора**. Появление этого прибора привело к настоящей революции в электроприводе переменного тока и вызвало его бурное развитие.

В 1960-е годы возникла совершенно новая область электроники – **оптоэлектроника**. Она позволила создать элементы, позволяющие разделить электрически отдельные части системы, и вместе с тем обеспечить

информационную связь между ними.

Развитие энергетической электроники определялось не только развитием силовых приборов, но и **систем управления**. Создание **операционных усилителей** связано с именем Роберта Видлара, который определил на многие годы структуру аналоговых интегральных микросхем. В 1959 г. Джек Килби и Роберт Нойс изобрели первую **цифровую интегральную микросхему**.

Первые **микропроцессоры** появились в начале 70-х годов. Они были разработаны фирмой *Intel* под руководством Марчиана Хоффа. Конец XX и начало XXI века – это время расцвета компьютерной техники и широчайшего применения ее во всех областях деятельности человека, в частности, в виде микроконтроллеров в системах управления вентильными преобразователями различного назначения.

Большой путь за минувшие сто лет прошла и схемотехника энергетической электроники. Трудно назвать здесь всех инженеров и ученых, внесших основополагающий вклад в ее развитие. Отметим лишь авторов самых распространенных силовых схем, ставших классическими: Гретца – автора однофазной мостовой схемы и Ларионова и Гретца – авторов трехфазной мостовой схемы.

Первая в СССР кафедра Промышленной электроники была создана в МЭИ под руководством профессора И.Л. Каганова в 1943 г.

Оглянувшись назад на путь пройденный **энергетической электроникой**, немного рассмотрим **перспективы ее развития**.

Большой резерв повышения энергоэффективности был заложен в возможности повышения единичной мощности приборов силовой электроники и уменьшения потерь в них.

Важнейшее значение имеет уменьшение вредного влияния вентильных преобразователей на питающую сеть вплоть до улучшения качества напряжения за счет вентильных преобразователей.

Рост степени интеграции цифровых элементов систем управления (СУ) сделали необратимой массовую замену аналоговых СУ на системы прямого цифрового управления. В пределе встроенные СУ интегрируются вместе с силовыми преобразователями и исполнительными двигателями в одно целое – механотронный модуль движения. Уменьшение мощности систем управления требует особого внимания к проблемам помехоустойчивости. Основные затраты при разработке СУ теперь приходится не на создание аппаратной части, а на разработку алгоритмического и программного обеспечения.

В связи с возрастающей степенью сложности электромеханических устройств огромное значение будет иметь и скорейшее внедрение информационных и компьютерных технологий в проектирование, конструирование, производство и эксплуатацию электроустановок.

Контрольные вопросы

1. Что изучает преобразовательная техника?
2. Для чего предназначены полупроводниковые преобразователи электрической энергии?
3. Что такое вентиль?
4. Что такое вентильный преобразователь?
5. Как классифицируются вентильные преобразователи?
6. Каковы области применения устройств преобразовательной техники?
7. Каковы основные направления развития преобразовательной техники?

Глава 2. ЭЛЕМЕНТЫ СИЛОВЫХ СХЕМ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

2.1. Состав силовых схем вентильных преобразователей

В данной главе будут рассмотрены в основном элементы, применяемые в силовых схемах.

К таким элементам относятся выпрямительные диоды, тиристоры, транзисторы, гибридные силовые схемы, трансформаторы, реакторы, конденсаторы, резисторы и элементы защиты вентильных преобразователей.

Выпрямительные диоды, тиристоры, транзисторы и гибридные силовые схемы обеспечивают преобразование электрической энергии и управление ее параметрами. Трансформаторы применяют для изменения переменного напряжения, изменения числа фаз и потенциального разделения частей схемы. Реакторы и конденсаторы обеспечивают накопление и отдачу энергии, выступают в качестве фильтров, замедляют скорость нарастания тока или напряжения. В резисторах рассеивается избыточная энергия в тех случаях, когда ее нельзя использовать. Элементы защиты вентильных преобразователей применяют для ограничения аварийных токов и перенапряжений. При описании этих элементов основное внимание будет уделено их схемам замещения, характеристикам и параметрам, а также переходным процессам. В тех случаях, когда этому не уделяется внимание в смежных курсах, будут рассмотрены принципы действия и конструктивные особенности.

2.2. Силовые диоды

Назначение и классификация силовых диодов

Диод – это двухэлектродный, неуправляемый полупроводниковый электропреобразовательный прибор, имеющий два вывода (*анод* со стороны *p*-слоя и *катод* со стороны *n*-слоя), содержащий один *p-n*-переход и обладающий односторонней проводимостью тока. Силовые диоды применяются в силовых цепях преобразователей. Их основное, но не единственное назначение, – это выпрямление переменного тока. Поэтому их называют выпрямительными диодами. Классификация силовых диодов представлена на рис. 2.1.

В зависимости от полупроводникового материала, использованного для создания приборов, силовые диоды подразделяются на:

- 1) кремниевые;
- 2) германиевые;
- 3) арсенид-галлиевые;
- 4) карбид-кремниевые.

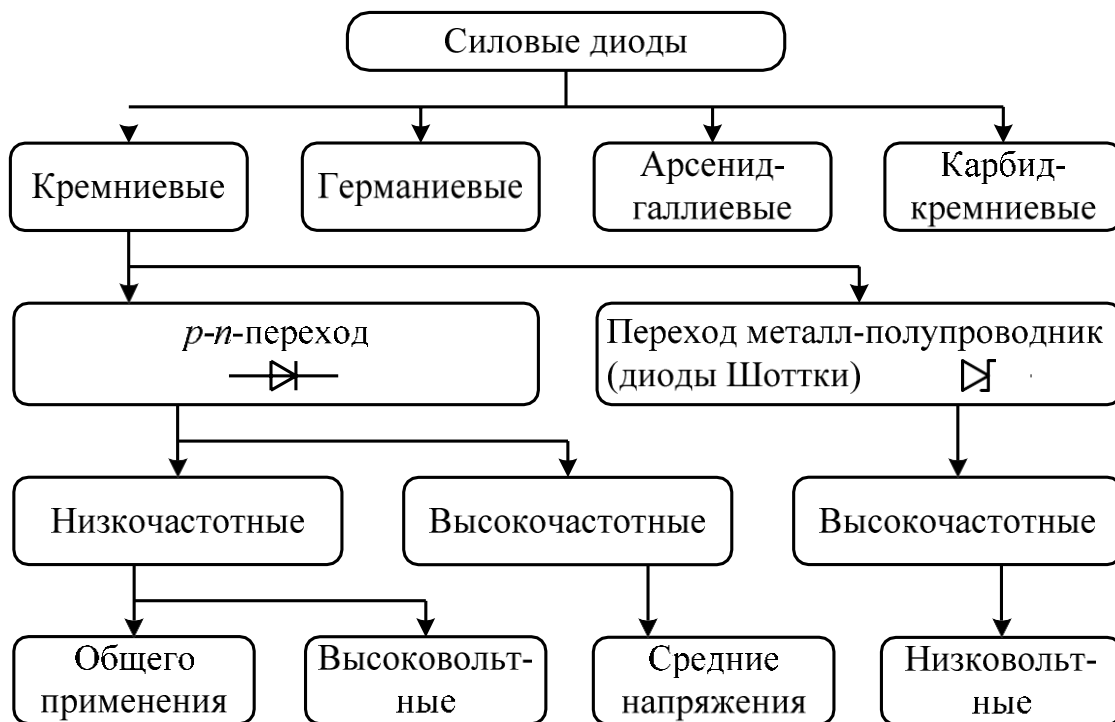


Рис. 2.1. Классификация силовых полупроводниковых диодов

По внутренней структуре и, следовательно, принципу действия силовые диоды подразделяются на:

- а) диоды на основе *p-n*-перехода;
- б) диоды на основе перехода металл-полупроводник (диоды Шоттки).

В зависимости от максимально допустимой частоты входного напряжения силовые диоды подразделяются на:

а) низкочастотные на основе $p-n$ -перехода ($f_{\max} < 10^3$ Гц);

б) высокочастотные на основе $p-n$ -перехода, но дополнительно легированные золотом, и диоды Шоттки ($f_{\max} > 10^3$ Гц и достигает десятков кГц).

По предельному напряжению силовые диоды подразделяются на:

а) диоды низкочастотные общего применения (на средние напряжения) на основе $p-n$ -перехода с допустимыми напряжениями до 1 кВ;

б) диоды низкочастотные высоковольтные на основе $p-i-n$ структур с допустимыми напряжениями до 10 кВ (i – слой собственного полупроводника);

в) диоды высокочастотные (быстровосстанавливающиеся) на средние напряжения на основе $p-n$ -перехода, но дополнительно легированные золотом, с допустимыми напряжениями до 1 кВ;

г) диоды высокочастотные (быстровосстанавливающиеся) низковольтные, на основе перехода металл-полупроводник (диоды Шоттки).

Условные обозначения полупроводников диодов показаны на рис. 2.1.

В настоящее время основное применение имеют кремниевые диоды, германиевые из-за низких допустимых температур практически не выпускаются, а арсенид-галлиевые и карбид кремниевые могут работать при более высоких температурах, чем кремниевые, но еще не стали широко применяемыми.

2.3. Статические характеристики и схема замещения силового диода при низкой частоте.

Выпрямительные диоды применяются в основном для построения выпрямителей в промышленных сетях переменного тока частотой 50 – 60 Гц. Выпрямление основано на свойстве $p-n$ -перехода, хорошо пропускать ток в одном направлении и почти не пропускать его в другом. Таким образом, выпрямительный диод представляет собой электронный ключ, управляемый приложенным к нему напряжением. При прямом напряжении ключ замкнут, при обратном – разомкнут. Такому электронному ключу соответствует вольтамперная характеристика (ВАХ) идеального диода (рис. 2.2 а). Однако в действительности диод не является идеальным, т.к. во включенном состоянии на нем падает прямое напряжение порядка 1 – 2 В, а в выключенном состоянии через диод протекает обратный ток, который мал. Поэтому ВАХ реального диода отличается от идеальной (см. рис. 2.2 б).

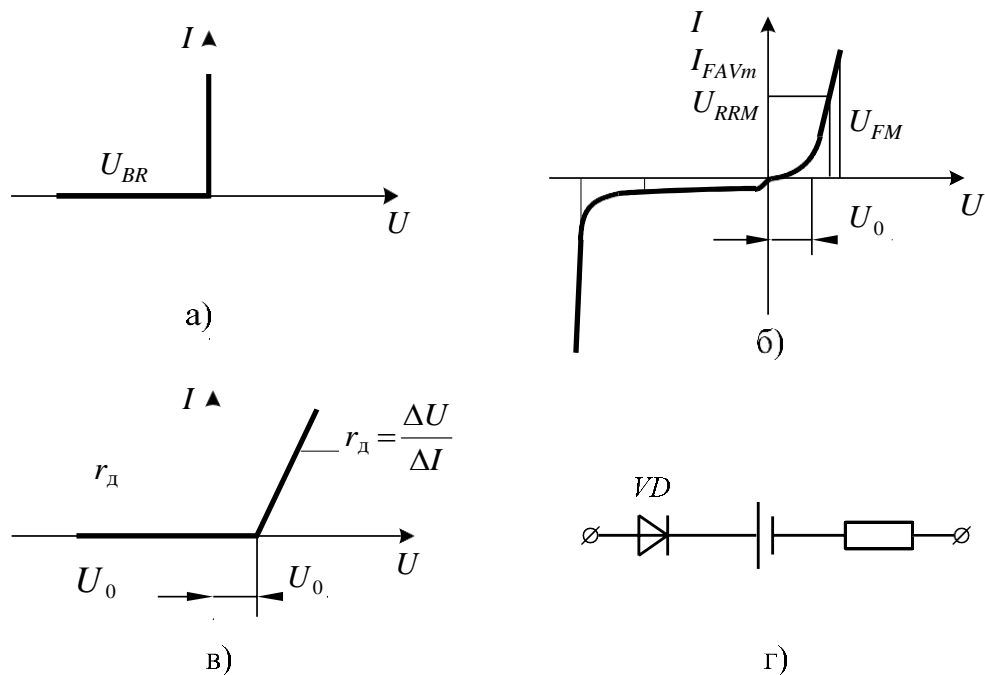


Рис. 2.2. Вольтамперные характеристики силового диода: идеальная (а), реальная (б), идеализированная (в) и его схема замещения (г)

При расчетах ВАХ аппроксимируются. Выделяют идеализированную ВАХ (см. рис. 2.2 в), которая позволяет учесть потери в проводящем состоянии, а для закрытого состояния диод считается идеальным (сопротивление равно бесконечности).

2.4. Динамические характеристики силовых диодов

Силовые диоды в вентильных преобразователях применяются в качестве обратных диодов, защищающих силовые ключи от обратного напряжения и создающих пути протекания реактивного тока нагрузки при запираии транзисторов. Эти процессы происходят с частотой в единицы и десятки кГц. Поэтому высокочастотные диоды, работающие в таких цепях, в отличие от выпрямительных, должны иметь малую длительность переходных процессов включения и выключения.

Рассмотрим переходные процессы включения и выключения диодов на примере однополупериодной схемы выпрямления, работающей на резистивную нагрузку R_d и питаемой от источника напряжения прямоугольной формы (рис. 2.3 а).

Напряжение на входе схемы в момент времени t_0 скачком приобретает положительное значение U_m . Из-за инерционности диффузионного процесса ток в диоде i_a появляется не мгновенно, а нарастает в течение времени t_{on} (см. рис. 2.3 б). Совместно с нарастанием тока в диоде снижается напряжение на диоде u_a , которое после времени установления прямого сопротивления t_{on} становится равным прямому напряжению U_F . В момент времени t_1 в цепи устанавливается стационарный режим, при котором ток нагрузки $I_{д} \approx U_m/R_d$.

В момент времени t_2 входное напряжение u изменяет свою полярность. Однако

до момента t_4 диод будет находиться в проводящем состоянии вследствие накопленного заряда на границе p - n -перехода, но направление тока в диоде i_a меняется на противоположное. По существу, происходит рассасывание зарядов на границе p - n -перехода, т.е. разряд эквивалентной емкости. В течение времени рассасывания t_s через диод протекает ток I_d , который ограничивается сопротивлением нагрузки R_d (см. рис. 2.3 б).

В момент времени t_3 напряжение на диоде u_a начинает быстро возрастать по модулю, а ток i_a спадать. Соответствующий отрезок времени t_f называют временем спада (см. рис. 2.3 б).

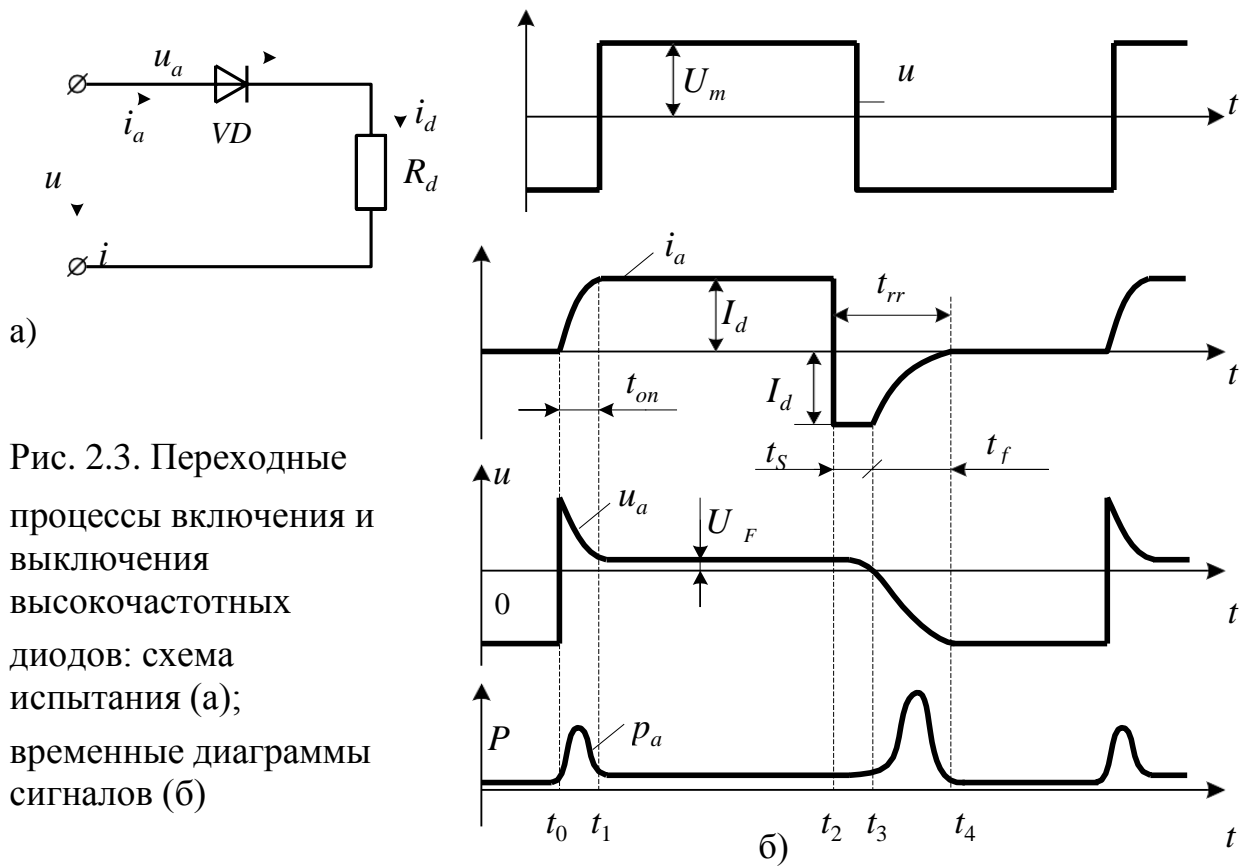


Рис. 2.3. Переходные процессы включения и выключения высокочастотных диодов: схема испытания (а); временные диаграммы сигналов (б)

Отрезок времени $t_{rr} = t_s + t_f$ называется временем восстановления обратного сопротивления. В течение этого времени диод восстанавливает свои запирающие свойства. Время t_{rr} характеризует быстродействие диодов.

Следует отметить, что при $R_d = 0$ (что соответствует работе диода на емкостную нагрузку, либо при включении диода в качестве обратного) обратный ток через диод в момент его запираения может во много раз превышать ток нагрузки в стационарном режиме.

2.5. Параметры силовых диодов

Полупроводниковые приборы характеризуются параметрами. *Параметры* – это численные значения величин, определяющих характерные точки ВАХ и допустимые режимы.

Параметры силовых диодов:

1) повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} – максимальное обратное напряжение, которое каждый период может прикладываться к диоду (см. рис. 2.2 б), которое примерно составляет 0,7 напряжения пробоя U_{BR} . В современных диодах оно достигает 10 кВ. U_{RRM} в сотнях вольт определяет класс выпрямительного диода. Например, если $U_{RRM} = 5000$ В, то диод 50 класса;

2) максимально допустимый средний прямой ток (предельный ток) I_{FAVm} , определяемый в однофазной однополупериодной схеме выпрямления при синусоидальном токе частотой 50 Гц, угле проводимости 180° и заданной температуре кристалла или корпуса.

3) максимальный обратный ток I_R (доли мкА – десятки мА);

4) импульсное прямое напряжение U_{FM} – максимальное значение прямого напряжения, обусловленное максимально допустимым средним прямым током I_{FAVm} (см. рис. 2.2 б). Оно составляет 1...3 В;

5) пороговое напряжение U_0 (0,5 ... 1,5 В) и дифференциальное сопротивление r_d (см. рис. 2.2 б – в).

6) время восстановления обратного сопротивления t_{rr} (см. рис. 2.3) – интервал времени, прошедший с момента прохождения тока через нуль (после изменения полярности приложенного напряжения) до момента, когда обратный ток достигнет заданного малого значения (доли нс – доли мкс для высокочастотных и 25... 100 мкс для низкочастотных);

7) заряд обратного восстановления Q_{rr} – используется для определения мощности потерь обратного восстановления (десятки нК – десятки мкК).

2.6. Разновидности силовых диодов

Диоды низкочастотные общего применения (на средние напряжения) на основе p – n -перехода с допустимыми напряжениями до 1 кВ выпускаются на токи до 8 кА. Время обратного восстановления диодов обычно находится в диапазоне 25... 100 мкс, что ограничивает их использование при частоте свыше 500 Гц. Их основное применение – неуправляемые выпрямители при промышленной частоте. *Диоды низкочастотные высоковольтные*, основанные на процессах в p – i – n структуре с допустимыми напряжениями до 10 кВ (i – слой собственного полупроводника). Слой собственного полупроводника, имеющий высокое сопротивление позволяет увеличить допустимое напряжение. *Диоды высокочастотные (быстровосстанавливающиеся)* на средние напряжения на основе p – n -перехода, но дополнительно легированные золотом методом диффузии. Атомы золота создают рекомбинационные центры, обеспечивающие ускорение рекомбинации носителей заряда после прохождения тока. Время восстановления

обратного сопротивления t_{rr} в них снижается в пределе до 100 нс. Предельный ток этих диодов 1 кА, допустимые напряжения достигают 1 кВ, а при некотором увеличении времени восстановления обратного сопротивления – 3 кВ. Быстровосстанавливающиеся силовые диоды применяются в схемах преобразователей при частотах 2 – 20 кГц для шунтирования запираемых тиристоров и транзисторов и пропускания тока в обратном направлении. Для высоковольтных преобразователей рекомендуется использовать специально разработанные ультрабыстрые диоды *Hexfred*, которые имеют величину обратного напряжения U_{RRM} до 1200 В, время обратного восстановления t_{rr} до 100 нс, прямое падение напряжения до 2,0 В, максимально допустимый средний прямой ток I_{FAVm} до 100 А и выше.

Диоды Шоттки – высокочастотные низковольтные диоды на основе перехода металл-полупроводник. Их особенностью является то, что прямой ток обусловлен движением только основных носителей – электронов. Таким образом, диоды Шоттки являются униполярными приборами с одним типом основных носителей. Отсутствие накопления неосновных носителей существенно уменьшает их инерционность. Время восстановления t_{rr} составляет обычно не более 0,3 мкс, падение прямого напряжения U_{FM} примерно 0,3 – 0,6 В. Значения обратных токов I_R в этих диодах на 2 – 3 порядка выше, чем в диодах с $p-n$ -переходом. Диапазон предельных обратных напряжений U_{RRM} обычно ограничивается 200 В, максимально допустимый средний прямой ток I_{FAVm} до 100 А. Диоды Шоттки применяются в схемах преобразователей при частотах 2 – 100 кГц для шунтирования полевых транзисторов и пропускания тока в обратном направлении.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются силовые диоды?
2. Как выглядит ВАХ силового диода?
3. Как и зачем идеализируют ВАХ силового диода?
4. Какие процессы происходят при включении и выключении диода?
5. Назовите параметры силовых диодов.
6. Укажите порядок величин параметров силовых диодов.
7. Назовите разновидности высокочастотных силовых диодов и их отличия

Тиристоры

2.7. Назначение и классификация тиристоров.

Тиристорами называются полупроводниковые приборы с тремя и более $p-n$ -переходами, предназначенные для использования в качестве электронных ключей в схемах переключения электрических токов. Классификация тиристоров представлена на рис. 2.4.

По способу управления тиристоры можно разделить на две группы:

а) *с неполной управляемостью* – включение осуществляется сигналом управления, а выключение – при спаде тока через прибор до нуля. К этой группе относятся следующие разновидности тиристоров: *асимметричный тиристор (SCR)*, *симистор*, *фототиристор* и *оптотиристор*. Тиристоры данной группы нашли широкое применение в регулируемом электроприводе постоянного тока, а также в системах плавного пуска асинхронных электродвигателей. На их основе строятся управляемые выпрямители тока, преобразователи переменного напряжения и др. виды преобразователей;

б) *полностью управляемые* – включение и выключение осуществляется сигналом управления. К этой группе относятся *запираемые тиристоры* и их разновидности: запираемый тиристор *GTO*, запираемый тиристор *GCT*, интегрированный запираемый тиристор *IGCT* и полевые тиристоры *MCT*.

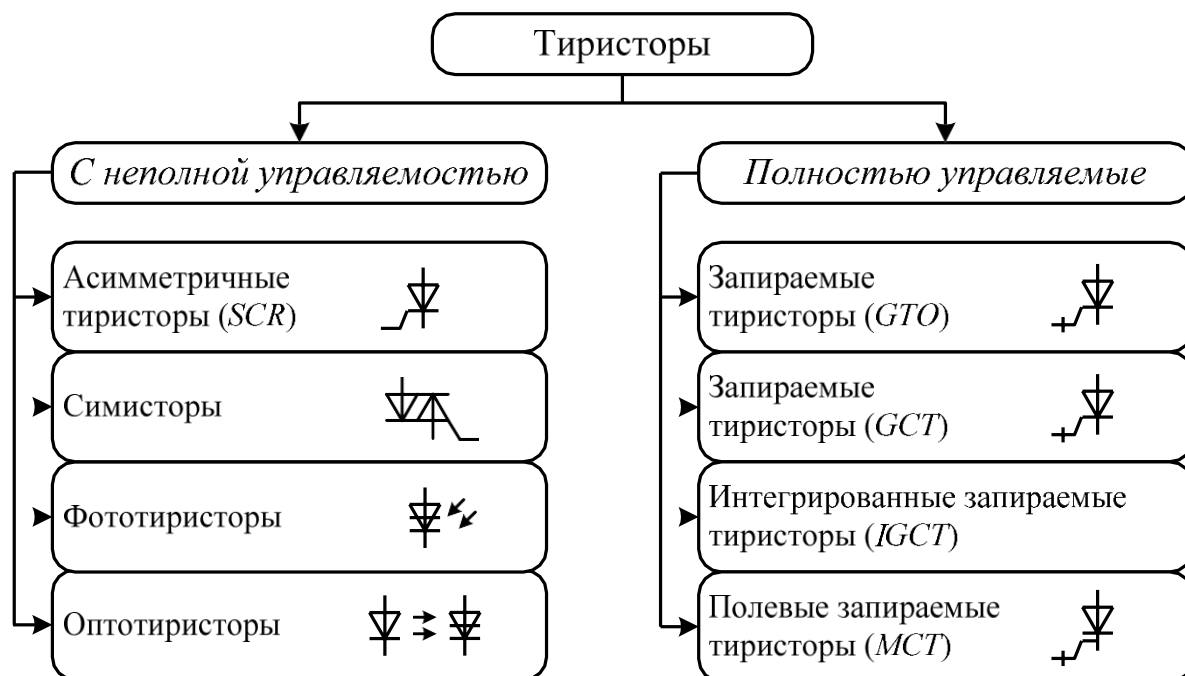


Рис.2.4. Классификация тиристоров.

Аббревиатура *GTO* – это сокращение названия *gate turn-off thyristor*. В переводе это значит **тиристор, включаемый выключаемый управлением**. Аббревиатура *GCT* – это сокращение названия *gate commutated thyristor*. В переводе это значит **тиристор, коммутируемый управлением**. Аббревиатура *IGCT* – это сокращение названия *integrated gate commutated thyristor*. В переводе это значит **интегрированный тиристор, коммутируемый управлением**. Аббревиатура *MCT* – это сокращение названия *MOS – control thyristor*. В переводе это значит **тиристор, управляемый МОП**.

Возможность полного управления предопределила их область применения – это регулируемый электропривод переменного тока (автономные инверторы напряжения для преобразователей частоты), мощные источники питания электрических подстанций, системы бесперебойного питания, статические компенсаторы и т.д.

Условные обозначения тиристоров показаны на рис. 2.4. В дальнейшем при изложении материала асимметричный тиристор будем называть просто тиристором.

Тиристор – это полупроводниковый прибор, содержащий четыре слоя с разным типом проводимости, способный под действием управляющего сигнала переходить из закрытого в открытое состояние.

Тиристоры с четырехслойной структурой *p-n-p-n* имеют три вывода: анод (А), катод (К) и управляющий электрод (УЭ) (рис. 2.5 а). Если напряжение на аноде по отношению к катоду положительное, то переходы П1 и П3 смещаются в прямом направлении, а П2 – в обратном.

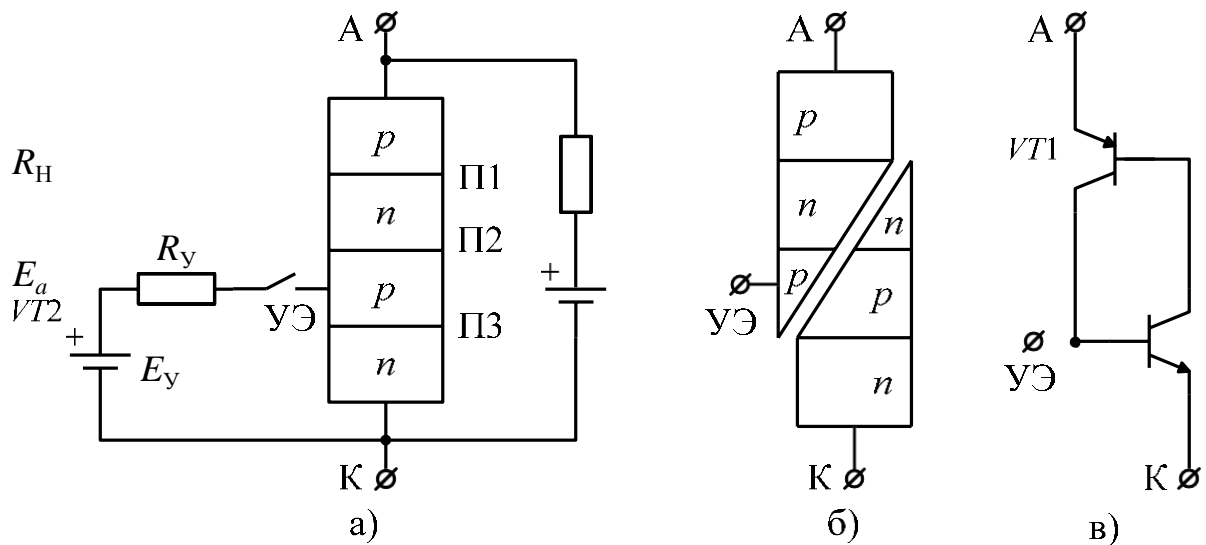


Рис. 2.5. Структура обычного тиристора (а) и его эквивалентная схема (б, в)

Структуру тиристора можно представить в виде двух соединенных трехслойных структур: *p-n-p* и *n-p-n* (см. рис. 2.5 б), эквивалентных биполярным

транзисторам $VT1$ и $VT2$ (см. рис. 2.5 в). Включение тиристора происходит при наличии между анодом и катодом положительного напряжения и подаче на его управляющий электрод импульса управления. Благодаря положительной обратной связи между эквивалентными транзисторами $VT1$ и $VT2$ процесс включения тиристора начинает лавинообразно развиваться до состояния, когда анодный ток становится равным значению, определенному сопротивлением нагрузки.

Анализируя процессы в схеме с эквивалентными транзисторами (см. рис. 2.5 в), можно убедиться в том, что если произошло включение тиристора (протекает анодный ток), то прекращение тока управления не приводит к выключению схемы. Это связано с наличием внутренней положительной обратной связи. Чтобы выключить тиристор нужно уменьшить ток в цепи анода до малой величины или приложить к нему обратное напряжение. Таким образом, обычный тиристор – это прибор с неполной управляемостью.

2.8. Разновидности тириستоров

Кроме обычных (асимметричных) тиристоров существуют их разновидности.

Тиристоры, которые могут пропускать и не пропускать ток в обоих направлениях, называются симметричными или **симисторами**. Вольтамперная характеристика симистора приведена на рис. 2.6 а. Симисторы выполняются на основе пятислойных структур. При подаче на управляющий электрод сигнала одной полярности симисторы включаются как в прямом направлении, так и в обратном. Они применяются для управления в цепях переменного тока. Рис. 2.6 б иллюстрирует, как для регулирования переменного тока можно применить встречно-параллельно включенные тиристоры $VS1$ и $VS2$. Вместо них можно включить один симистор.

Фототиристор – это фотоэлектронный прибор, имеющий четырехслойную структуру, как обычный тиристор, но управляемый световыми импульсами. Свет обычно попадает на обе базы тиристора. При этом с ростом освещенности возрастают эмиттерные токи транзисторов $VT1$ и $VT2$, что в конечном итоге приводит к включению фототиристора. ВАХ фототиристора имеет такой же вид, как и для обычного тиристора, только вместо тока управления управляющим воздействием у фототиристора служит световой поток. Фототиристоры используются для коммутации световым сигналом электрических сигналов большой мощности.

Фототиристор со встроенным в него излучателем (светодиодом) называется **оптотиристором**. Оптотиристоры позволяют значительно упростить построение систем управления полупроводниковых преобразователей электроэнергии, так как они обеспечивают потенциальную развязку силовых цепей и цепей управления.

Неполная управляемость обычных тиристоров существенно снижает эффективность их применения. Для устранения этого недостатка созданы и

продолжают разрабатываться тиристоры, запираемые сигналом, подаваемым на управляющий электрод. Среди них в настоящее время чаще всего выделяют четыре вида запираемых тиристоров.

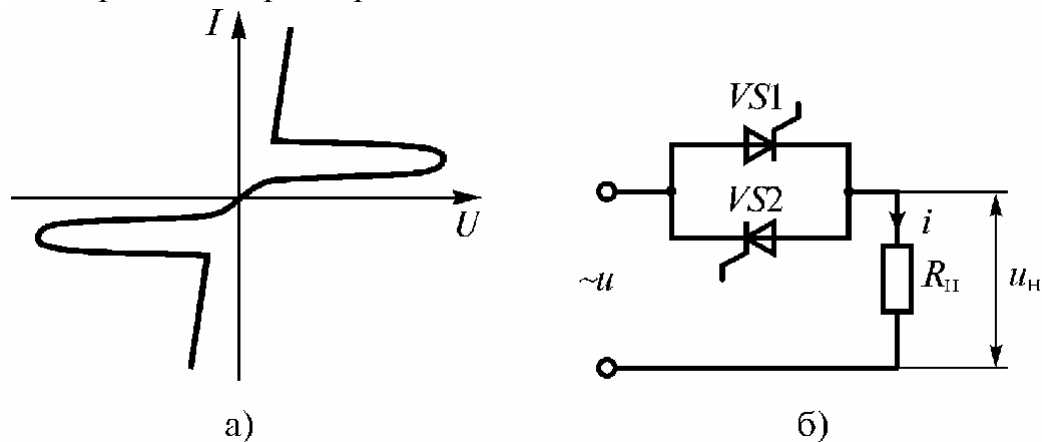


Рис. 2.6. ВАХ симистора (а) и схема включения тиристоров, реализующая такую ВАХ (б)

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия обычного (асимметричного) тиристора.
2. Объясните вид выходной ВАХ тиристора.
3. Каково назначение диаграммы управления и как ею пользоваться?
4. От чего и как зависит переходный процесс при включении тиристора?
5. Как протекает процесс выключения тиристора?

2.9.Транзисторные ключи

Классификация транзисторов

Транзистор – это электропреобразовательный прибор, содержащий два и более $p-n$ -переходов, имеющий три и более вывода и предназначенный для усиления мощности. В силовой электронике транзисторы практически всегда применяются только в ключевом режиме, то есть могут быть либо полностью открыты, либо полностью закрыты. Транзисторы обычно не допускают приложения к ним обратного напряжения и, поэтому, шунтируются встречно включенными диодами. Такое сочетание транзистора и диода будем называть **транзисторным ключом**.

В настоящее время существует множество различных типов транзисторов. На рис. 2.7. приведена классификация основных типов транзисторов.

Транзисторы по принципу действия делятся на **биполярные** (управляемые током), **униполярные** (управляемые электрическим полем или **полевые**) и **IGBT-транзисторы**. Аббревиатура *IGBT* – это сокращение названия *Insulated gate bipolar transistor*. В переводе это значит **биполярный транзистор с изолированным**

затвором (БТИЗ). В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей зарядов обоих знаков: электронов и дырок, поэтому они называются биполярными.

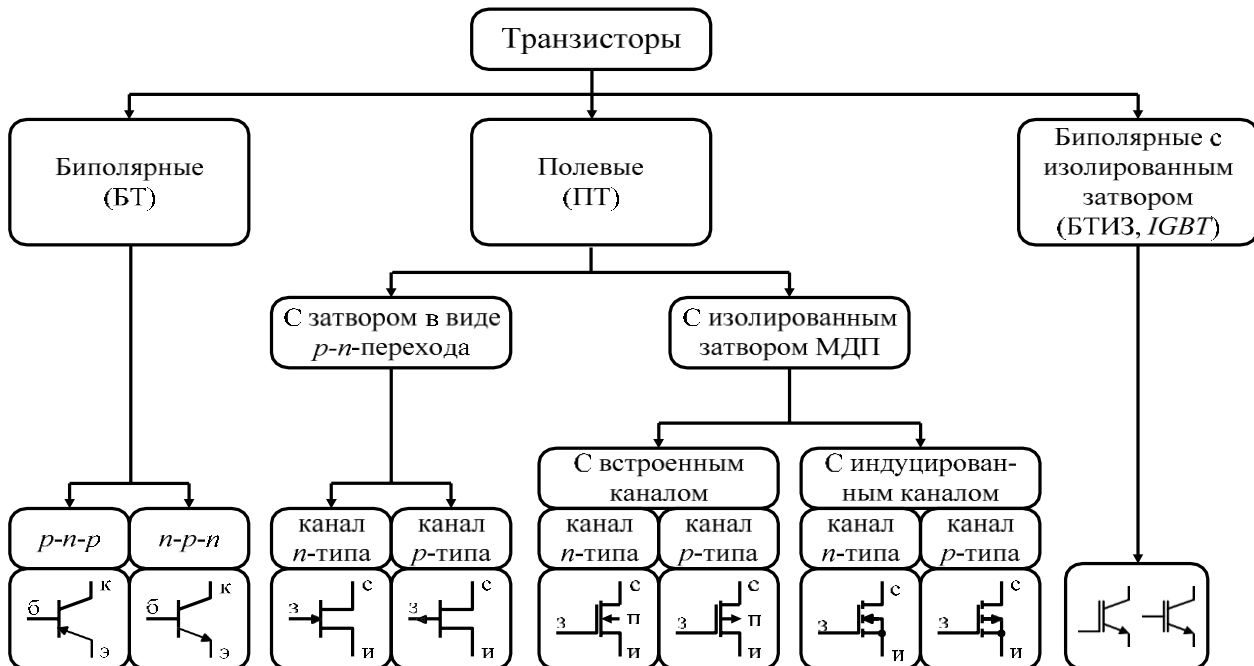


Рис.2.7. Классификация основных типов транзисторов (к-коллектор, э-эмиттер, б-база, с-сток, и-исток, з – затвор, п-подложка)

В полевых транзисторах ток определяется шириной проводящего канала, по которому движутся носители зарядов одного знака, отсюда их другое название – униполярные.

IGBT-транзисторы являются гибридными, в них сочетаются положительные свойства биполярных и полевых транзисторов.

Биполярные транзисторы содержат три чередующихся слоя с различным типом проводимости. Средний слой структуры называется **базой**. Крайний слой, являющийся источником носителей заряда, называется **эмиттером**. Другой крайний слой, принимающий заряды, называется **коллектором**. В зависимости от порядка их чередования биполярные транзисторы делятся на транзисторы типа *n-p-n* и *p-n-p*.

Полевые транзисторы (ПТ) делятся по принципу действия на **ПТ с затвором в виде *p-n*-перехода** и на **ПТ с изолированным затвором (ПТИЗ)**. Последние по их структуре называют также **МОП-транзисторами** (металл – окисел – полупроводник) или **МДП-транзисторами** (металл–диэлектрик– полупроводник). Электрод, из которого выходят основные носители, называется **истоком**. Электрод, куда приходят основные носители, называется **стоком**. От истока к стоку носители

двигаются по **каналу**. Электрод, регулирующий ширину канала, называется **затвором**. **МОП-транзисторы** могут быть выполнены с встроенным и с индуцированным каналом. МОП-транзисторы с **встроенным** каналом при отсутствии управляющего сигнала открыты (нормально открыты). МОП-транзисторы с **индуцированным** каналом при отсутствии управляющего сигнала закрыты (нормально закрыты). Из полевых транзисторов **МОП-транзисторы** с индуцированным каналом получили наибольшее применение в преобразовательной технике. В зависимости от типа полупроводника, из которого выполнен канал, ПТ делятся на ПТ с каналом *n*-типа и ПТ с каналом *p*-типа. **Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)** или, как они сокращенно называются по-английски **IGBT**, представляют собой гибрид биполярного транзистора и ПТИЗ, сочетающий их лучшие свойства. БТИЗ– это сложная многослойная структура и процессы в ней весьма сложны. Поэтому на рис.2.8. приведена очень упрощенная схема замещения. При подаче на затвор **З** напряжения, положительного относительно точки **Э**, ПТИЗ открывается и начинает проходить ток от точки **К** через эмиттерно-базовый переход биполярного транзистора и открытый ПТИЗ к точке **Э**. При этом открывается биполярный транзистор, через который проходит ток от точки **К** к точке **Э**. Буквами **Э**, **К**, **З** обозначены эмиттер, коллектор и затвор БТИЗ. БТИЗ могут работать только в ключевом режиме.

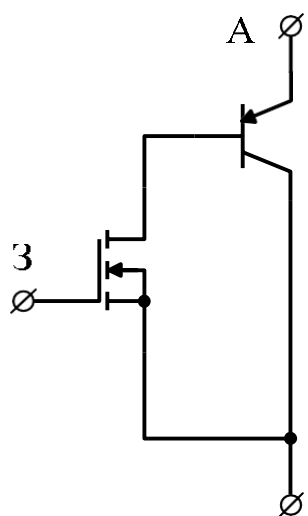


Рис.2.8. Упрощенная схема БТИЗ.

2.10. Основные статические параметры транзисторов. Основные параметры биполярных транзисторов

По току коллектора:

- максимально допустимый ток коллектора $I_{к.мах}$ при заданной температуре корпуса (достигает 200 А);
- ток обратно смещенного коллекторного перехода (через запертый транзистор) $I_{к0}$.

По напряжению на коллекторе:

- максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ.мах}$ при токе базы равно нулю (достигает 1000 В);
- напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{кэ.нас}$ при заданном токе коллектора (1–2 В и более);

$I_{к.мах}$ и $U_{кэ.мах}$ не могут достигать одновременно максимальных значений.

По мощности: максимальная мощность рассеяния на коллекторе $P_{к.мах}$ при заданной температуре корпуса.

По управлению:

- коэффициент передачи (усиления) по току в схеме с общим эмиттером β (до сотен, у высоковольтных это единицы);
- максимально допустимое обратное напряжение база-эмиттер $U_{бэ.мах}$;
- предельная частота усиления в схеме с общим эмиттером f_{β} , при которой коэффициент β уменьшается в $\sqrt{2}$.

Тепловые параметры:

- тепловое сопротивление переход-корпус (при применении охладителя) $R_{Т(П-К)}$;
- тепловое сопротивление переход-окружающая среда (при отсутствии охладителя) $R_{Т(П-С)}$;
- максимально допустимая температура перехода $T_{п.мах}$.

Здесь $R_T = \Delta T / P_k$; ΔT – разность температур между окружающей средой или корпусом и переходом.

Основные параметры ПТИЗ и БТИЗ .

Основные параметры ПТИЗ и БТИЗ практически одинаковы, только взамен названий электродов сток и исток употребляются термины коллектор и эмиттер.

2.11. Трансформаторы

Назначение и классификация трансформаторов

Работа трансформаторов основана на явлении взаимной индукции. Трансформаторы служат для передачи электрической энергии из одной электрической цепи переменного тока в другую, с которой не должно быть потенциальной связи. При этом одновременно может изменяться величина напряжения. Таким образом, трансформаторы предназначены для обеспечения потенциальной развязки и изменения напряжения. Вместе с тем они могут применяться в совершенно разных цепях, решать разные задачи.

По конкретному назначению и решаемым задачам трансформаторы делятся на:

- а) силовые трансформаторы, применяемые в сетях переменного тока;
- б) силовые трансформаторы для вентильных преобразователей, применяемые в силовых схемах вентильных преобразователей;
- в) высокочастотные трансформаторы, применяемые в сетях переменного тока повышенной и высокой частоты;
- г) измерительные трансформаторы, применяемые при измерениях в цепях переменного тока для потенциальной развязки;
- д) импульсные трансформаторы, применяемые для потенциальной развязки при передаче импульсов, например в цепях управления вентильных преобразователей.

Вышеперечисленные трансформаторы могут сильно отличаться по конструкции, мощности, габаритам и т.д. В данной главе будут рассмотрены только силовые трансформаторы для вентильных преобразователей. Поэтому в дальнейшем их будем называть сокращено: силовые трансформаторы или просто трансформаторы. Трансформаторы широко применяются в вентильных преобразователях. Основное назначение силовых трансформаторов в вентильных преобразователях – согласование величины напряжения питающей сети и напряжения, требуемого на выходе вентильного преобразователя. Кроме этого трансформаторы обеспечивают потенциальную развязку между сетью и нагрузкой. Некоторые схемы вентильных преобразователей неосуществимы без трансформаторов со сложными обмотками.

2.12. Основные параметры трансформаторов

Основные параметры трансформаторов:

U_1, U_2 – действующие значения первичного и вторичного напряжения;

I_1, I_2 – действующие значения первичного и вторичного тока;

$n = U_1 / U_2$ – коэффициент трансформации;

$u_k\%$, $u_{ка}\%$, $u_{кр}\%$ – напряжение короткого замыкания в процентах и его активная и реактивная составляющие;

S_1, S_2, S_T – расчетные мощности первичных и вторичных обмоток и расчетная

мощность трансформатора;

P_{XX} – потери холостого хода при номинальном напряжении сети;

$P_{KЗ}$ – потери короткого замыкания при номинальном токе;

η_T – коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора. При мощностях в диапазоне 50 – 250 кВА, номинальном токе и активной на- грузке составляет 96 – 98%;

I_{XX} – ток холостого хода трансформатора. При мощностях в диапазоне 50 – 250 кВА составляет от 10 до 2% номинального тока первичной обмотки трансформатора $I_{ном}$.

Для номинальных значений напряжений и токов будем добавлять индекс «НОМ».

Расчетная мощность обмоток трансформатора определяется кажущейся мощностью обмоток переменного тока:

$$S_1 = m_1 U_1 I_1$$

$$S_2 = m_2 U_2 I_2$$

где m_1, m_2 – число фаз на первичной и вторичной стороне трансформатора.

2.13. Схемы замещения и характеристики трансформаторов

Для анализа процессов в выпрямителе необходимо учесть параметры трансформатора. Схема замещения однофазного трансформатора приведена на рис. 2.9 а. На схеме r_1 и r_2' – активное сопротивление первичной и приведенное активное сопротивление вторичной обмоток; x_1 и x_2' – индуктивное сопротивление рассеяния первичной и приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмоток; x_m и r_m – индуктивное и активное сопротивление в контуре намагничивания. Для упрощения пренебрежем током холостого хода и потерями в контуре намагничивания, то есть примем, что $r_m = 0$, $x_m = \infty$. Это достаточно справедливо в мощных трансформаторах, где мал ток намагничивания. Тогда схема замещения преобразуется к виду рис. 2.9 б. Для анализа процессов в выпрямителе необходимо привести параметры трансформатора к стороне вентилялей. Схема замещения трансформатора, приведенная к вторичной стороне (стороне вентилялей), показана на рис. 2.9 в. На схеме e_2 и u_2 – вторичная ЭДС и вторичное напряжение; r_a и x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления.

$$r_a = r' + r_2$$

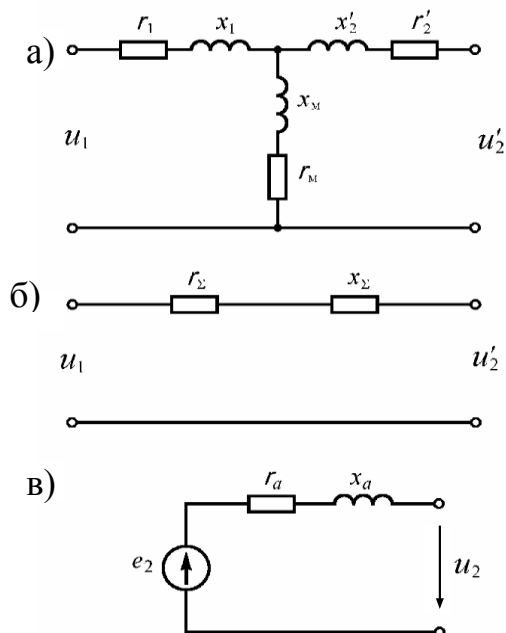


Рис. 2.9. Схема замещения трансформатора, приведенная к первичной стороне (а), ее упрощение (б) и упрощенная схема, приведенная к вторичной стороне (в)

Контрольные вопросы

1. Для чего применяются трансформаторы?
2. Для чего применяются трансформаторы в вентильных преобразователях?
3. Поясните преобразования схемы замещения трансформатора.
4. Как зависят параметры схемы замещения от мощности трансформатора?
5. Как классифицируются трансформаторы?
6. Как упрощается схема замещения для трансформаторов большой мощности?
7. Поясните характеристики трансформаторов.
8. Какой фактор влияет на КПД трансформатора?
9. Какой фактор влияет на ток холостого хода трансформатора?
10. Каков КПД у трансформатора на холостом ходу?

Глава 3. ВЫПРЯМИТЕЛИ ТОКА

3.1. Классификация и структурные схемы выпрямителей

Выпрямители делятся на выпрямители тока и выпрямители напряжения. В **выпрямителях тока** ток на выходе протекает в одном направлении, а мгновенные значения напряжения на выходе могут менять полярность. В качестве вентилей в них применяют диоды и тиристоры.

В **выпрямителях напряжения** напряжение на выходе не меняет полярность, а ток на выходе может менять направление. В качестве вентилей в них применяют диоды и транзисторы или запираемые тиристоры.

В настоящее время основное применение имеют выпрямители тока. Именно они рассматриваются в этой и последующих главах. Для сокращения в дальнейшем будем называть их просто выпрямителями, опуская слово тока. Выпрямители напряжения сложнее и будут рассмотрены позже.

Выпрямители тока классифицируются по ряду признаков (рис. 3.1).

1. **По числу фаз** выпрямители делятся:

- а) на однофазные, которые питаются от однофазной сети;
- б) на многофазные, которые питаются от многофазной сети.

2. **По числу выпрямляемых полуволн** выпрямители делятся:

- а) на однополупериодные;
- б) на двухполупериодные.

3. **По построению схем** выпрямители делятся на следующие:

а) нулевые (однотактные, в которых ток по вторичной обмотке трансформаторов протекает в одном направлении);

б) мостовые (двухтактные, в которых ток по вторичной обмотке трансформаторов протекает в двух направлениях). В мостовой схеме трансформатор может отсутствовать.

4. **По мощности** выпрямители делятся на следующие:

- а) малой мощности (до сотен ватт);
- б) средней мощности (до десятков киловатт);
- в) большой мощности (сотни и тысячи киловатт на диодах);

5. **По возможностям управления** выпрямители делятся):

- а) на неуправляемые, выполненные на диодах
- б) на управляемые, выполненные на тиристорах.

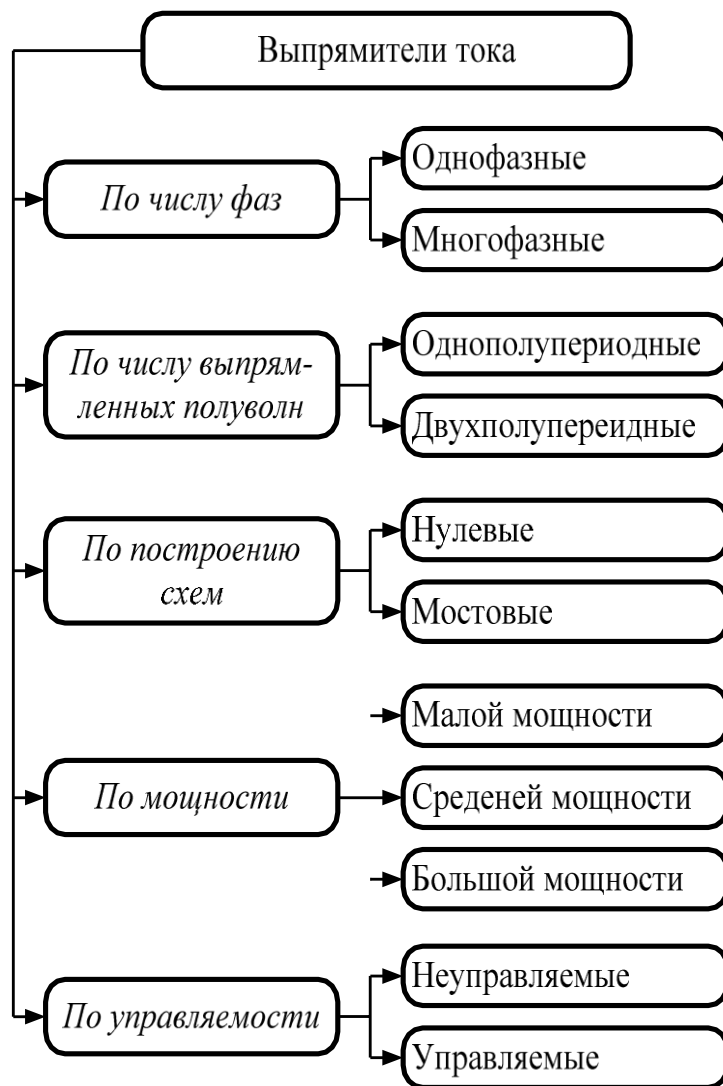


Рис.3.1. Классификация выпрямителей тока.

На рис. 3.2 приведена **обобщенная структурная схема выпрямителя**, содержащая сетевой фильтр СФ, трансформатор Т, вентильный блок ВБ, сглаживающий фильтр СГФ, стабилизатор СТ, систему управления СУ и нагрузку Н. Энергия из сети подается через **сетевой фильтр**, служащий для уменьшения вредного влияния выпрямителя на питающую сеть. **Трансформатор** служит для согласования выпрямленного напряжения и напряжения сети, а также для потенциального разделения нагрузки и сети. **Вентильный блок** служит для выпрямления переменного тока. **Сглаживающий фильтр** осуществляет фильтрацию (сглаживание) выпрямленного напряжения. **Стабилизатор** обеспечивает поддержание с необходимой точностью требуемой величины постоянного напряжения на нагрузке в условиях изменения напряжения питающей сети и тока нагрузки. **Система управления** в управляемом выпрямителе обеспечивает регулирование выпрямленного напряжения.

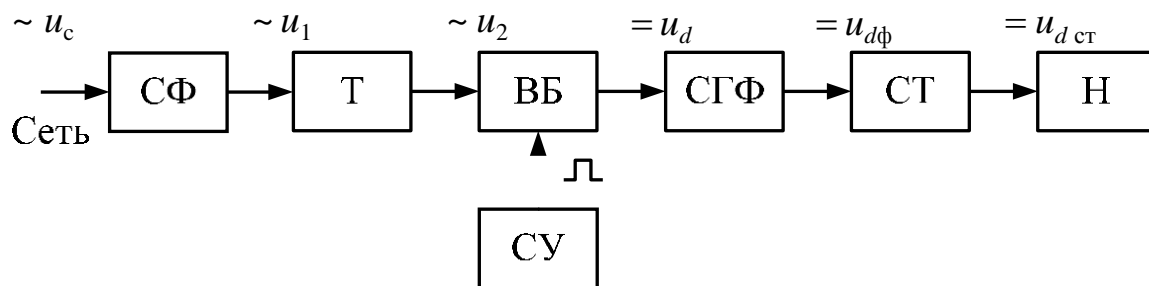


Рис. 3.2. Обобщенная структурная схема выпрямителя

Не все указанные блоки обязательно присутствуют в схеме. В зависимости от предъявляемых требований могут отсутствовать все блоки, кроме ВБ. Однако, в большинстве случаев необходим и трансформатор. Поэтому в дальнейшем процессы рассматриваются для комплекта Т – ВБ. Наличие сглаживающего фильтра оказывает значительное влияние на режим работы выпрямителя и его элементов. Существенным при этом является характер входной цепи сглаживающего фильтра, определяющий совместно с внешней нагрузкой вид нагрузки выпрямителя. Возможны следующие **виды нагрузок** выпрямителя (с учетом фильтра):

- а) активная;
- б) активно-индуктивная (например, выпрямитель работает на обмотку возбуждения двигателя);
- в) активно-индуктивная с противо-ЭДС (выпрямитель работает на якорь двигателя);
- г) активно-емкостная (емкостный фильтр).

Контрольные вопросы

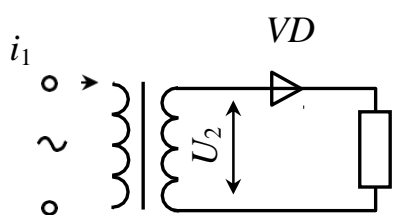
1. По каким признакам классифицируются выпрямители?
2. Какова структурная схема выпрямителя и почему она может упрощаться?
3. Какие возможны виды нагрузок выпрямителя?

3.2. Однофазные выпрямители.

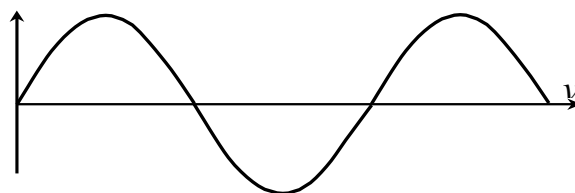
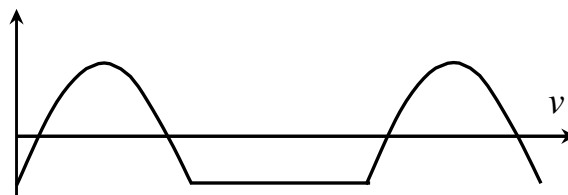
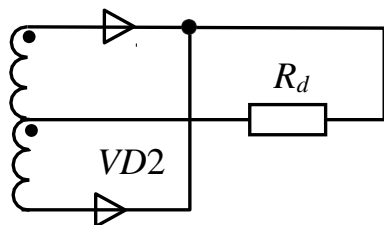
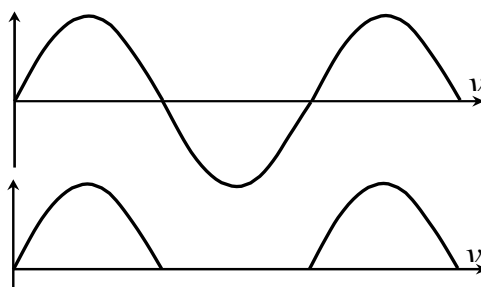
Однофазная однополупериодная схема выпрямления.

Схемы однофазных выпрямителей, снабженных диаграммами изменения напряжений и токов при активном характере нагрузки R_d и в предположении идеальности параметров диодов и трансформаторов, приведены на рис. 3.3.

Самая простая схема — однофазная однополупериодная (см. рис. 3.3,а). Под действием напряжения вторичной обмотки трансформатора $u_2 = U_{2m} \cdot \sin \nu$ где $\nu = \omega t$, ток в цепи нагрузки протекает только в течении тех полупериодов, когда анод диода VD имеет положительный потенциал относительно катода.



а)



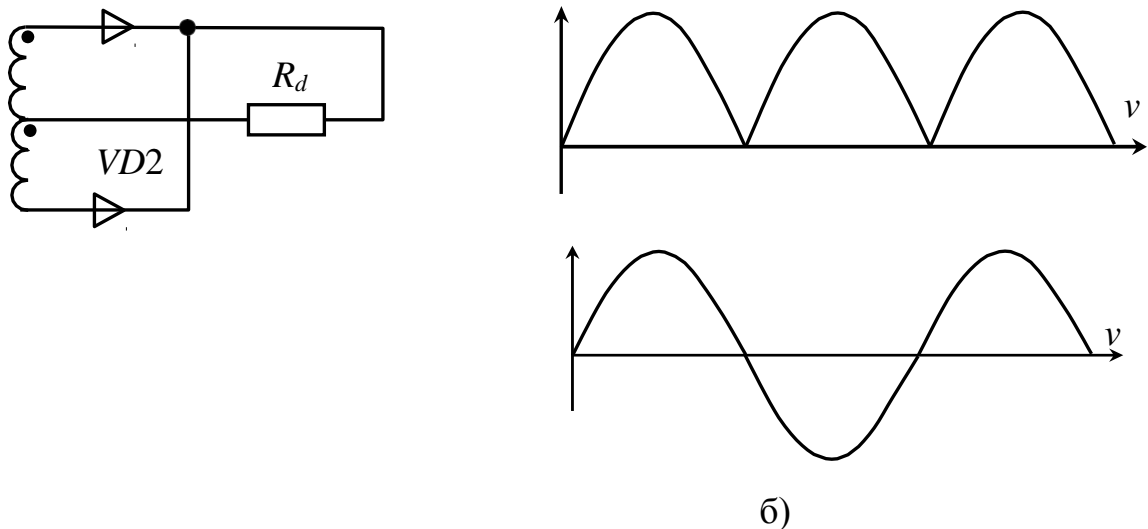


Рис.3.3. Схемы однофазных неуправляемых выпрямителей и диаграммы их работы. (а-б)

Переменная составляющая выпрямленного напряжения, как следует из диаграммы u_d велика, причем основная гармоника этой составляющей имеет частоту, равную частоте питающей сети. В сердечнике трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки создается добавочный постоянный магнитный поток, насыщающий сердечник. Это явление принято называть вынужденным намагничиванием сердечника трансформатора. В результате насыщения намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз по сравнению с током в нормальном режиме намагничивания сердечника. Потребляемый из сети ток i_1 несинусоидален. Вследствие больших пульсаций выпрямленного напряжения и вынужденного намагничивания сердечника трансформатора рассматриваемая схема выпрямления самостоятельно применяется редко (в источниках питания маломощной аппаратуры).

3.3. Многофазные выпрямители

Трехфазная нулевая схема и ее разновидности

Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (**трехфазная нулевая схема**) приведена на рис. 3.4 а, а временные диаграммы токов и напряжений при $L_d = \infty$ – на рис. 3.4.б

В каждый момент времени в схеме проводит вентиль той фазы, которая наиболее положительна. За нуль принят потенциал нулевого провода. Выпрямленное напряжение формируется из вершущек полувольт. Ток I_d постоянен, т.к. $L_d = \infty$ (см. выше). Напряжение на первом вентиле – это потенциал точки a относительно точки k . Потенциал точки a относительно нуля изображен кривой e_{2a} , потенциал точки k относительно нуля изображен вершущками полувольт e_{2a} , e_{2b} , e_{2c} . Напряжение между точками a и k равно отрезкам ординат, заключенным между вышеназванными кривыми.

В начале на диаграмме u_a всегда нужно отметить участки проводимости, где падение напряжения равно нулю, а затем отложить заштрихованные ординаты

Схема широко применяется в электроприводах малой и средней мощности.

При применении бестрансформаторных схем для питания двигателей напряжением 220 В от общей сети осуществляется параллельная работа трехфазных схем выпрямления с нулевым выводом от одного общего цехового трансформатора (рис. 3.7.). **При разном включении вентилей потоки вынужденного намагничивания взаимно компенсируются** и условия работы трансформатора не ухудшаются.

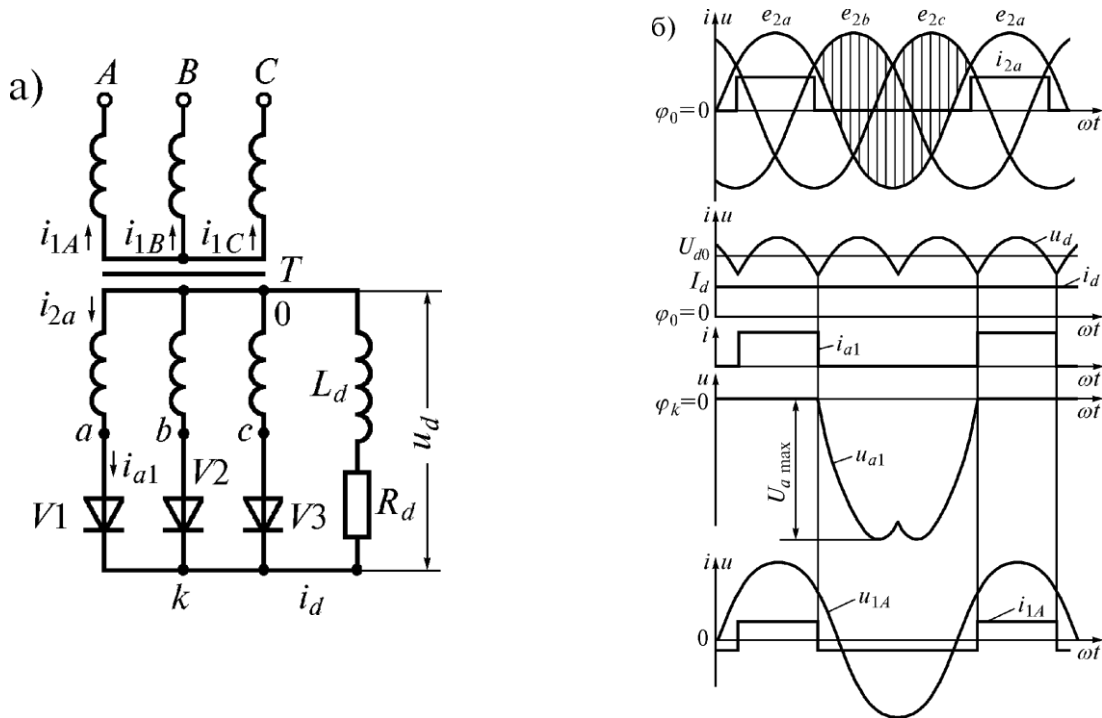


Рис. 3.4. Трехфазная нулевая схема выпрямления (а) и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие ее работу при $L_d = \infty$ (б)

Шестифазная нулевая схема

На вторичной стороне трехфазного трансформатора может быть создана шестифазная система напряжений (рис. 3.5). Для этого на каждом стержне необходимо разместить по две обмотки, работающие в противофазе. При этом схема выпрямления превращается в схему **шестифазная звезда с нулевым выводом (шестифазная нулевая схема)**.

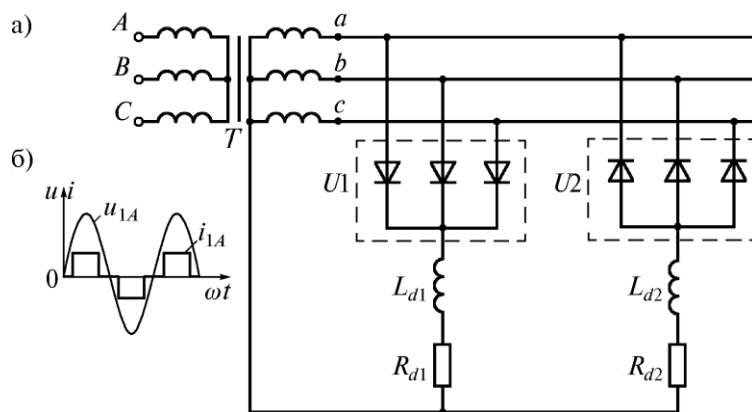


Рис.3.5. Параллельная работа трехфазных нулевых схем выпрямления от общей сети при отдельных нагрузках и разном включении вентилей (а); поясняющие диаграммы первичного тока и напряжения (б)

Преимущества этой схемы – лучше качество выпрямленного напряжения (шестифазные пульсации), проще управление, т.к. все вентили имеют общий катод.

Недостатки – наличие переменного по знаку потока вынужденного намагничивания трехкратной частоты, плохое использование трансформатора и вентилей (работают 1/6 периода), плохая (круто падающая) внешняя характеристика.

Последний недостаток превратился в преимущество и обусловил применение схемы в сварочных трансформаторах, где требуется ограничение тока при коротких замыканиях.

Трехфазная мостовая схема

Трехфазная мостовая схема выпрямления (**схема Ларионова**) приведена на рис. 3.8. а, а временные диаграммы токов и напряжений при $L_d = \infty$ – на рис. 3.8. б. Вентили V2, V6, V4, у которых соединены аноды, называют **анодной тройкой вентилей**; V1, V3, V5, у которых соединены катоды, – **катодной тройкой вентилей**. В катодной тройке вентилей проводит вентиль, у которого анод самый положительный; в анодной тройке вентилей проводит вентиль, у которого катод самый отрицательный. Если в данный момент фаза *a* самая положительная, а *c* – самая отрицательная, то ток проходит от фазы *a* через V1 в нагрузку, через V2 на фазу *c*. Нумерация вентилей соответствует порядку их работы. Выпрямленное напряжение u_d формируется из вершущек линейных напряжений. Ток нагрузки i_d из-за наличия в схеме индуктивности сглажен. На рисунке он представлен прямой линией. Токи через вентили $i_{a1} \dots i_{a6}$ изображаются прямоугольниками, соответствующими участкам проводимости. Вторичный ток i_{2a} переменный, а первичный i_{1A} имеет такую же форму. В отличие от трехфазной нулевой

схемы трансформатор работает в нормальных условиях.

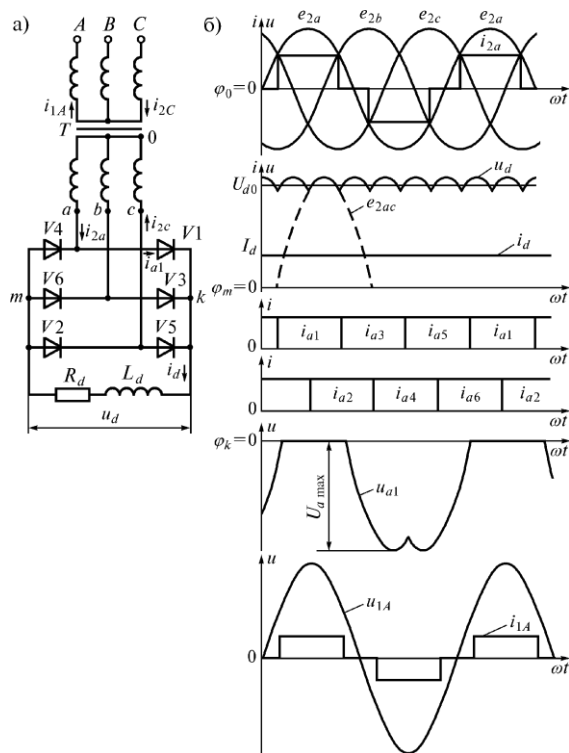


Рис. 3.8. Трехфазная мостовая схема выпрямления (схема Ларионова) (а) и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие ее работу при $L_d = \infty$ (б)

Сравнение многофазных схем выпрямления

Преимущества трехфазной мостовой схемы:

- 1) минимальная расчетная мощность трансформатора, трансформатор работает в хорошем режиме, нет потока вынужденного намагничивания;
- 2) самое маленькое обратное напряжение на вентиле;
- 3) самое большое выпрямленное напряжение при том же фазном;
- 4) малые пульсации;
- 5) возможность применения бестрансформаторной схемы.

Недостаток: двойное падение напряжения на вентилях, что особенно важно при малых напряжениях.

Преимущества трехфазной нулевой схемы (по сравнению с мостовой):

- 1) простота;
- 2) меньше падение напряжения на вентилях, что особо важно при низких напряжениях;
- 3) меньше вентиляей, но они рассчитаны на большее напряжение;
- 4) возможность применения бестрансформаторной схемы.

Недостаток: наличие потока вынужденного намагничивания. Трехфазные схемы выпрямления находят широкое применение в выпрямителях средней и большой мощности. **В большинстве случаев применяется трехфазная мостовая схема.** Трехфазная нулевая схема может оказаться целесообразной при низких напряжениях,

а также в бестрансформаторных выпрямителях.

Схема с уравнительным реактором имеет преимущества при больших токах и низких напряжениях.

Контрольные вопросы

1. Какие схемы применяются в многофазных выпрямителях?
2. Как работают многофазные схемы выпрямления?
3. Покажите контур прохождения тока в каждой из изученных схем.
4. Как и зачем строятся временные диаграммы токов и напряжений?
5. Почему и как влияет характер нагрузки на форму токов в выпрямителе?
6. Какова частота пульсаций в изучаемых схемах?
7. Как определяются основные соотношения между токами и напряжениями в схемах выпрямления?
8. Как возникает поток вынужденного намагничивания?
9. Методы борьбы с потоком вынужденного намагничивания.

Глава 4. ВЕДОМЫЕ ИНВЕРТОРЫ.

4.1.Классификация инверторов

Инвертирование – это преобразование постоянного тока в переменный.

Существует два типа инверторов: ведомые и автономные.

Ведомые инверторы (ВИ) работают на сеть, в которой есть другие источники электроэнергии. Коммутации вентилях в них осуществляются за счет энергии этой сети. Частота на выходе ВИ равна частоте сети, а напряжение – напряжению сети.

Автономные инверторы (АИ) – это инверторы, которые работают на сеть, в которой нет других источников электроэнергии. Коммутации вентилях в них осуществляются благодаря применению полностью управляемых вентилях или устройств искусственной коммутации. При этом частота на выходе АИ определяется частотой управления, а напряжение – параметрами нагрузки и системой регулирования.

Наиболее часто ведомые инверторы применяются, когда нужно отдать механическую энергию, запасенную в маховых массах электродвигателя и рабочей машины, обратно в сеть. Торможение электропривода, осуществляемое таким образом, является наиболее энергетически эффективным. Количество возвращаемой энергии может быть весьма велико.

Автономные инверторы применяются для получения регулируемой частоты в электроприводах переменного тока, а также для получения более высоких частот в электротермических и электротехнологических установках. Они являются основной частью преобразователей частоты.

Контрольные вопросы

1. Что такое инвертирование?
2. Что такое ведомый инвертор?
3. Чем отличается автономный инвертор от ведомого?
4. Какова область применения ведомых инверторов?
5. Какова область применения автономных инверторов?

4.2. Переход от выпрямительного к инверторному режиму

Ведомые инверторы выполняются по тем же схемам, что и управляемые выпрямители. **Переход от выпрямительного к инверторному режиму** возможен в системе (рис. 4.1 а), содержащей выпрямитель и электрическую машину (ЭМ).

На рис. 4.1 б приведены диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие процессы в выпрямителе, нагруженном на ЭМ, работающую в двигательном режиме. ЭДС выпрямителя создается в основном положительными участками полуволн напряжения и ее среднее значение положительно. Также положительна ПЭДС двигателя.

Если угол управления увеличить до 90° , то ЭДС выпрямителя уменьшится до нуля, и двигатель остановится. При этом ЭДС выпрямителя в одинаковой степени создается положительными и отрицательными участками полуволн напряжения (рис. 4.1 в).

Изменение направления потока мощности в системе, содержащей вентили, возможно только по второму способу, описанному выше. Для того чтобы перейти из выпрямительного режима в инверторный нужно:

- 1) привести во вращение ЭМ в другом направлении, подведя к ней механическую энергию и переведя ее в генераторный режим;
- 2) увеличить угол управления (больше 90°), чтобы в основном использовать отрицательные участки полуволн напряжения сети и сделать среднее значение ЭДС инвертора отрицательным (рис. 4.1 г).

При описании процессов в ведомом инверторе, кроме угла управления α (угла запаздывания), используется угол управления β (угол опережения), отсчитываемый от точки, находящейся через 180° от точки естественной коммутации. Следовательно,

$$\beta = 180^\circ - \alpha.$$

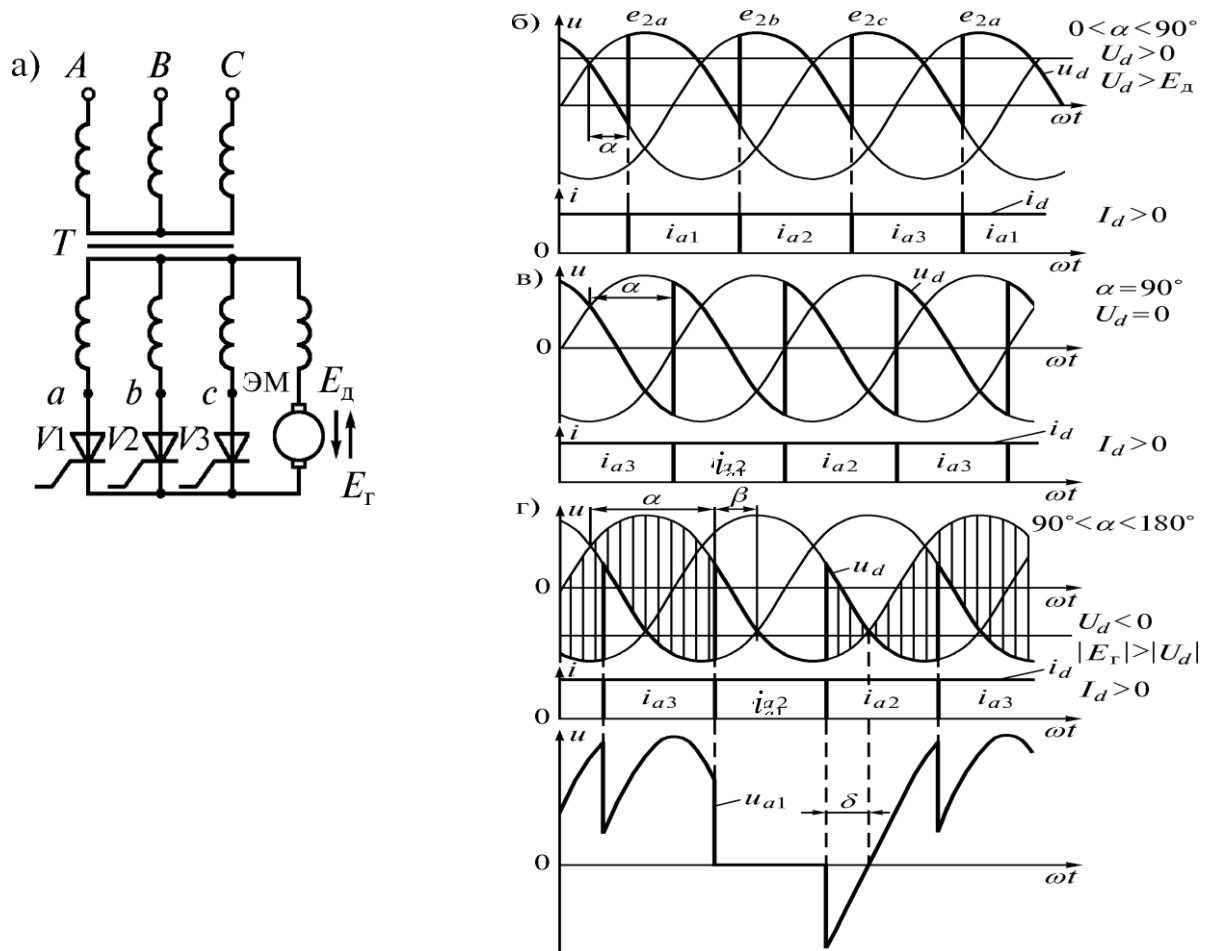


Рис. 4.1. Переход из выпрямительного в инверторный режим в трехфазной нулевой схеме (а); б, в, г – диаграммы токов и напряжений при различных углах α , иллюстрирующие процессы в схеме.

Угол управления β не может достигать 0° , т.к. требуется время на восстановление запирающих свойств тиристора в прямом направлении (см.рис. 4.1 г).

Контрольные вопросы

1. Как изменяется направление потока мощности при переходе от выпрямительного к инверторному режиму?
2. Как определить угол опережения?
3. Что требуется для перехода из выпрямительного режима в инверторный?

4.3. Регулировочные и внешние характеристики ведомого инвертора

Преобразователь, который может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режиме назовем **ведомым преобразователем**. На рис. 4.2. приведены внешние и регулировочные характеристики ведомого инвертора в режиме непрерывного тока совместно с характеристиками выпрямителя.

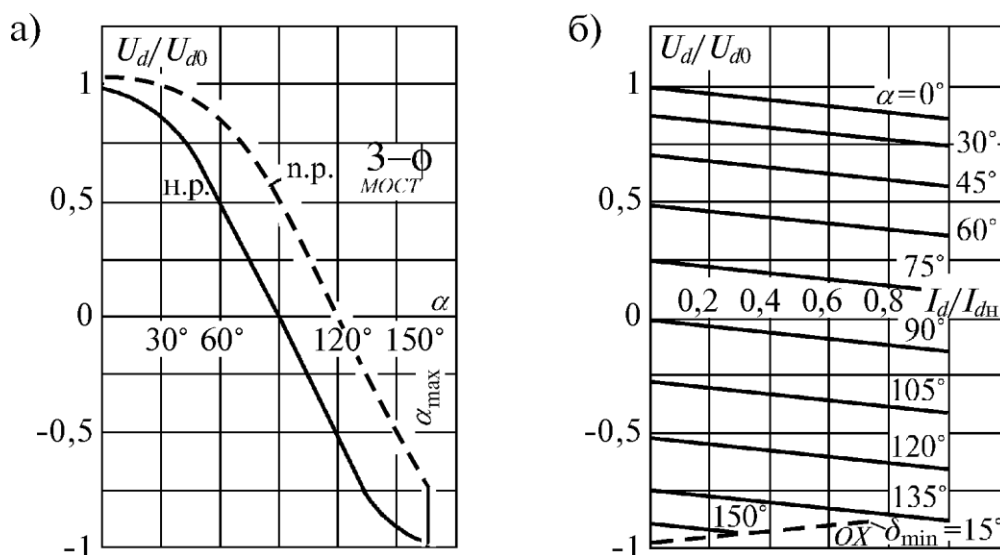


Рис. 4.2. Регулировочные характеристики ведомого преобразователя в непрерывном (н.р.) и прерывистом (п.р.) режиме при работе на ПЭДС (а) и его внешние характеристики в непрерывном режиме (б)

Напряжение на зажимах постоянного тока инвертора назовем **инvertируемым напряжением**. Так как оно измеряется между теми же точками, что и выпрямленное, то будем обозначать их одинаково – U_d . Закон изменения этого напряжения при изменении угла управления тот же, что и в выпрямительном режиме. Поэтому регулировочная характеристика ведомого преобразователя в непрерывном режиме (см. рис. 4.2. а) определяется тем же уравнением

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cos \alpha .$$

Коммутация вентиля происходит за счет напряжения сети, и на участке коммутации напряжение идет посередине между фазными ЭДС (рис. 4.3 а – б). За счет дополнительной коммутационной площадки с ростом тока напряжение по модулю увеличивается. Внешние характеристики приведены на рис.4 .3 б.

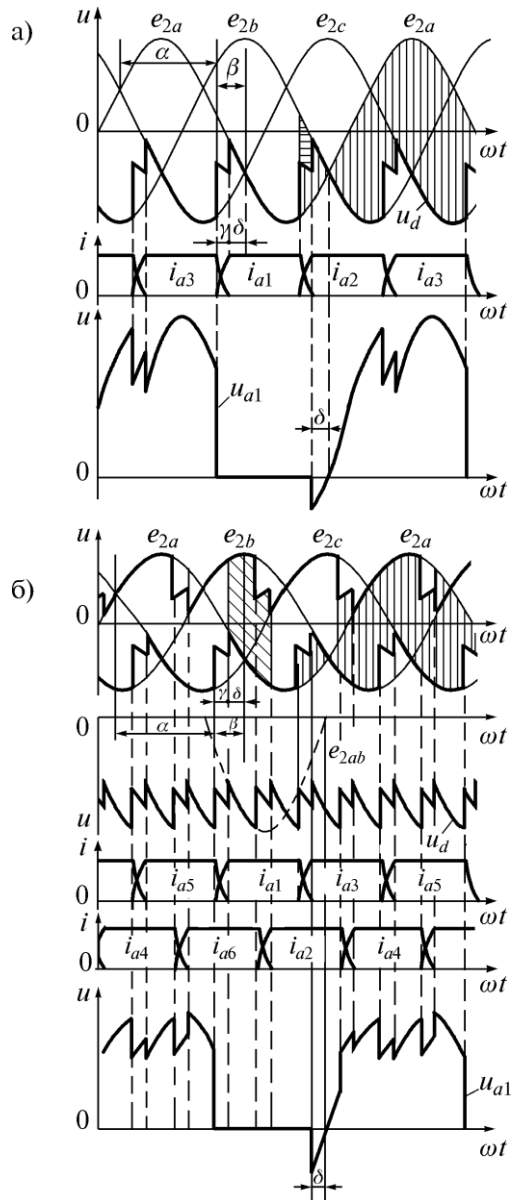


Рис.4.3. Диаграммы токов и напряжений в ведомом инверторе для трехфазной нулевой (а) и мостовой (б) схем.

В первом квадранте (для выпрямителя) они связывают выходные величины и являются выходными. Характеристики в 4-м квадранте (ведомого инвертора) связывают входные величины (по энергетическому каналу) и поэтому являются входными. Внешние характеристики выпрямителя по смыслу являются выходными, и поэтому выходное напряжение за счет внутреннего сопротивления с ростом тока падает. Внешние характеристики инвертора являются по смыслу входными и поэтому, если необходимо «загнать» в инвертор большой ток, нужно подать на вход большее напряжение. Внешние характеристики с учетом наличия области прерывистого

режима приведены на рис 4.4.

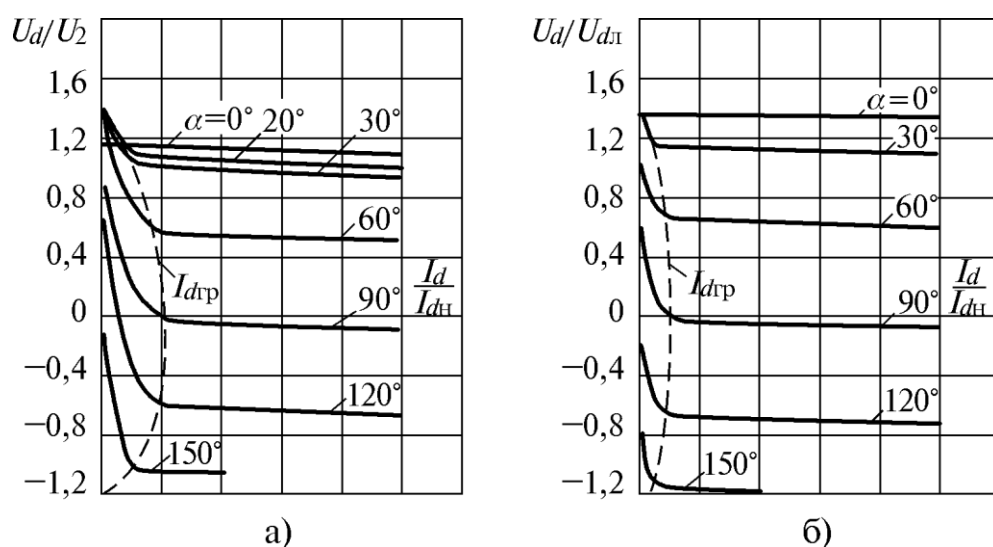


Рис. 4.4. Внешние характеристики ведомого преобразователя, выполненного по трёхфазной нулевой (а) и трёхфазной мостовой (б) схемам

Контрольные вопросы

1. Каков вид внешних и регулировочной характеристик ведомого инвертора в режиме непрерывного тока?
2. Каков вид внешних и регулировочной характеристик ведомого инвертора в режиме прерывистого тока?
3. Какие факторы и как влияют на наклон внешних характеристик?

Глава 5. РЕКУПЕРИРУЮЩИЕ И РЕВЕРСИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

5.1. Классификация рекупирующих преобразователей

Рекупирующий преобразователь электроэнергии – это преобразователь, допускающий передачу мощности в обоих направлениях, т.е. от сети к электрической машине и обратно. Рекупирующие преобразователи бывают 2-х видов:

1) **однокомплектные** рекупирующие преобразователи, обеспечивающие протекание тока в питающей или приемной цепи только в одном направлении («Переход из выпрямительного в инверторный режим»);

2) **двухкомплектные** рекупирующие преобразователи, обеспечивающие протекание тока в питающей или приемной цепи в обоих направлениях.

Двухкомплектные рекупирующие преобразователи делятся:

1) на **обратимые преобразователи**, обеспечивающие передачу мощности в обоих направлениях за счет изменения направления постоянного тока при неизменной полярности постоянного напряжения;

2) на **реверсивные преобразователи**, обеспечивающие передачу мощности в обоих направлениях, как за счет изменения направления напряжения, так и за счет изменения направления тока.

5.2. Внешние и регулировочные характеристики

Регулировочные и внешние характеристики реверсивного преобразователя в непрерывном режиме представлены на рис. 5.1. Они аналогичны характеристикам нереверсивных преобразователей, но учитывают наличие двух комплектов вентиля с противоположным направлением токов и напряжений.

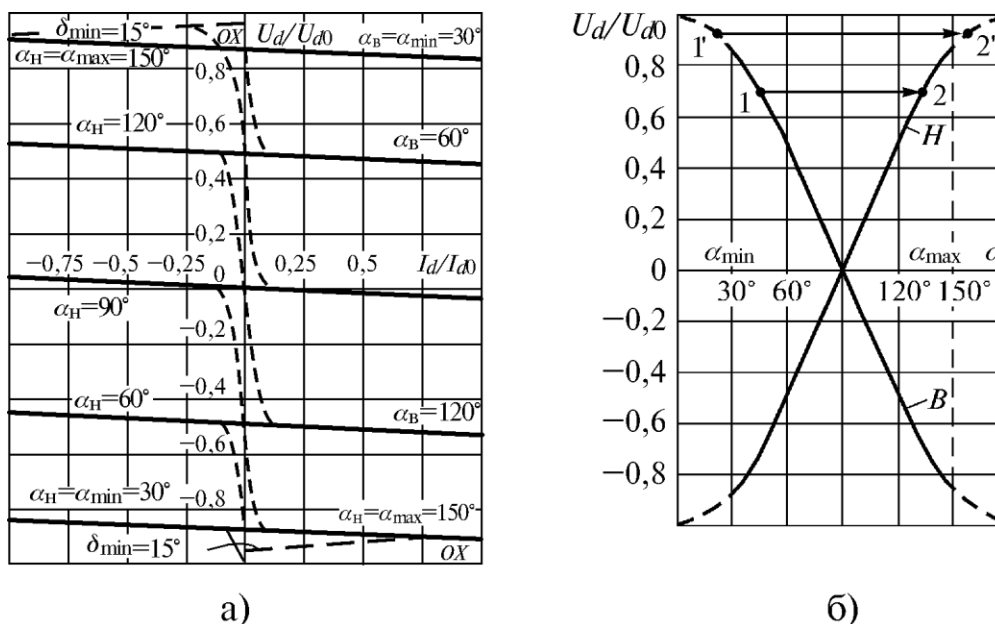


Рис. 5.1. Внешние, ограничительные (а) и регулировочные (б) характеристики реверсивного преобразователя. Участки внешних характеристик в прерывистом режиме при раздельном управлении даны пунктиром.

В реверсивном преобразователе имеется угол α_{max} , который выбирается из условий инвертирования, чтобы не произошло опрокидывание инвертора. Чтобы произвести реверс, необходимо вначале произвести рекуперативное торможение, при этом двигатель переходит в генераторный режим, напряжение мгновенно изменяться не может, а ток проходит через 2-й комплект, работающий в инверторном режиме. На рис. 5.2 б при этом происходит переход из точки 1 в точку 2.

Переход из точки 1' в точку 2' невозможен из-за опрокидывания инвертора. Поэтому в выпрямительном режиме вводится угол α_{min} из условий предотвращения опрокидывания инвертора.

Контрольные вопросы

1. Каков вид регулировочных и внешних характеристик реверсивного преобразователя в непрерывном режиме?
2. Чем определяются углы α_{\max} и α_{\min} ?
3. Для чего вводится ограничение в регулировочной характеристике преобразователя?

Глава 6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕДОМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

6.1. Классификация систем импульсно-фазового управления вентильными преобразователями

Системой управления (СУ) вентильным преобразователем (ВП) называется устройство, предназначенное для формирования импульсов управления и регулирования длительности открытого состояния силовых ключей ВП в функции сигнала управления. Системы управления ВП делятся на ведомые и автономные. В литературных источниках системы управления ведомыми преобразователями получили название **систем импульсно- фазового управления (СИФУ)**.

В зависимости от числа фаз напряжения сети и конфигурации силовой схемы вентильного преобразователя СИФУ подразделяются на **однофазные** и **многофазные**. К первой группе относятся СИФУ, управляющие работой, например, однополупериодным или двухполупериодным мостовым выпрямителем. СИФУ, входящие в состав ВП, где силовой блок выполнен, например, по трехфазной мостовой или трехфазной схеме с нулевым выводом относятся к разряду многофазных.

По характеру взаимодействия СИФУ с напряжением сети различают **многоканальные** и **одноканальные синхронные**, а также **асинхронные** системы импульсно-фазового управления.

Многоканальными синхронными СИФУ называются такие системы, где каждый из ее каналов синхронизирован с соответствующей фазой напряжения сети. Количество каналов синхронизации подобной СИФУ соответствует числу фаз напряжения сети. Обобщенная функциональная схема многоканальной синхронной системы импульсно-фазового управления на примере тиристорного выпрямителя показана на рис. 6.2.

СИФУ содержит устройства синхронизации (УС1–УС3), генераторы опорных напряжений (ГОН1–ГОН3), компараторы (К1–К3), блок ограничения углов (БОУ), формирователи импульсов управления силовыми тиристорами (ФИ1–ФИ3), распределитель (РИ) и усилитель мощности (УМ) импульсов управления.

Рассмотрим более подробно взаимодействие элементов многоканальной синхронной СИФУ (см. рис. 6.1) на примере трехфазной мостовой схемы выпрямления, работающей на активно-индуктивную нагрузку (рис. 6.2 а).

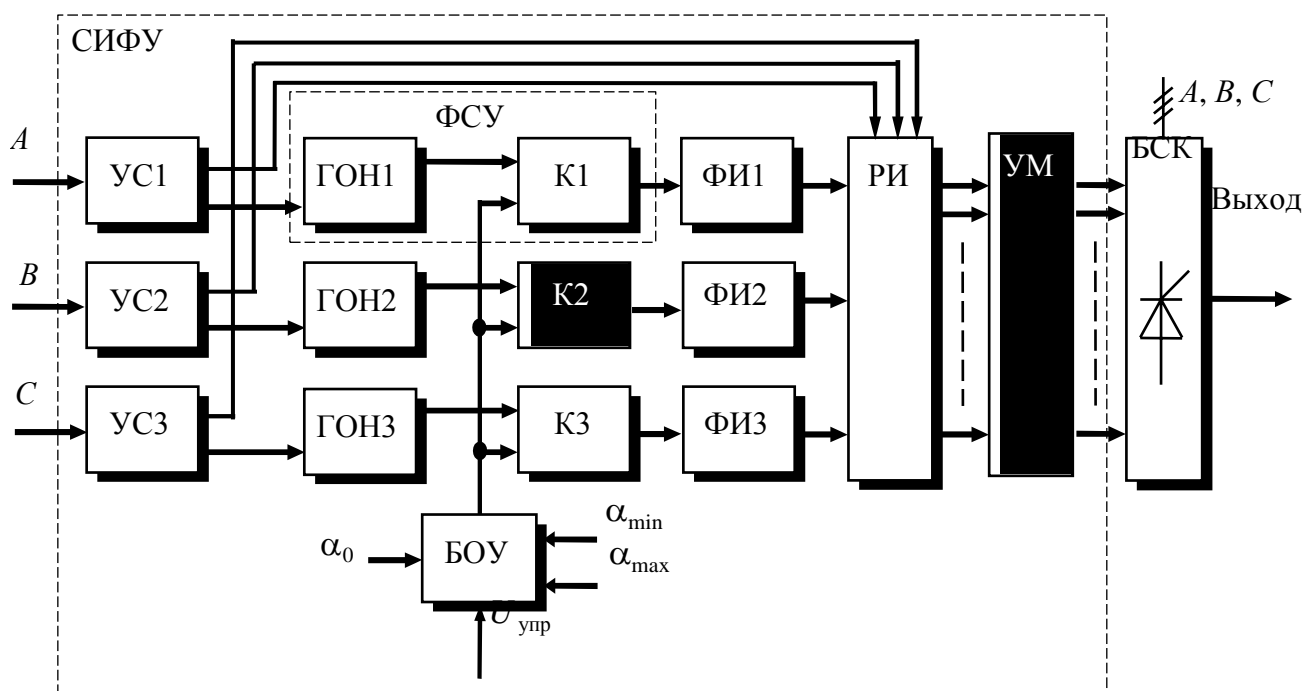


Рис. 6.1. Обобщенная функциональная схема многоканальной синхронной СИФУ трехфазным нереверсивным тиристорным преобразователем

Как уже говорилось, в данной схеме выпрямления выделяют **анодную** VS_4, VS_6, VS_2 и **катодную** VS_1, VS_3, VS_5 **тройки вентиляей**. В катодной тройке вентиляей проводит вентиль, у которого анод самый положительный; в анодной тройке вентиляей проводит вентиль, у которого катод самый отрицательный. Задача СИФУ сформировать управляющие импульсы тиристоров $VS_1 - VS_6$ синхронизированных с сетью, следующих друг за другом через 60 эл.град и сдвигаемых по фазе в функции сигнала управления $U_{упр}$. В трехфазных схемах выпрямления угол управления α отсчитывается от точки естественной коммутации, которая совпадает с моментами перехода линейного напряжения через ноль или сдвинута на 30 эл.град относительно фазного напряжения одной из фаз A, B, C . Рассмотрим взаимодействие элементов многоканальной синхронной СИФУ на основе канала фазы A , т.к. в остальных каналах процессы аналогичны. С помощью УС1 формируется сигнал логической «1», заключенный между точками $d - l$, в течение которого на управляющий переход силового тиристора VS_1 может быть подан импульс управления. Генератор опорного напряжения ГОН1 формирует пилообразный сигнал развертки с линейно нарастающим и дискретным фронтами $u_{гон1}$, синхронизированный с фазой A . При выполнении условия $U_{упр} \leq u_{гон1}$ компаратор К1 переключается в состояние «1» и по переднему фронту запускает ФИ1, на выходе которого

формируются импульсы управления силовыми тиристорами $VS1$ и $VS4$ одной стойки моста, имеющие стабильную длительность, необходимую для включения тиристоров.

Нетрудно заметить, что интервалы пауз между импульсами управления смежных тиристоров как катодной, так и анодной

групп (например, тиристоров $VS1$ и $VS3$) составляет 120 эл.град, а между импульсами управления одной фазы (например, тиристоры $VS1$ и $VS4$) – 180эл.град.

Таким образом, в многоканальных синхронных СИФУ каждый канал синхронизирован с напряжением соответствующей фазы напряжения сети и является по отношению к ней ведомым каналом преобразования информативного входного сигнала в интервал времени (угол управления α).

Из всех возможных вариантов СИФУ многоканальные синхронные системы обладают максимальным быстродействием. Их основным **недостатком** является взаимная асимметрия импульсов управления по каждому из каналов (порядка 0,5–3 эл.град), обусловленная естественным разбросом характеристик их элементов, а также степенью искажения параметров напряжения сети.

Одноканальные синхронные СИФУ отличаются тем, что в них с напряжением сети (независимо от числа фаз) синхронизирован только один канал управления, который является ведущим, а все последующие – формируют импульсы управления тиристорами путем отсчета заданного интервала времени от базовой точки, за которую принимается момент времени образования управляющего импульса на выходе ведущего канала преобразования (необходимо отметить, что для однофазных однополупериодных ТП понятия одноканальная и многоканальная СИФУ совпадают).

В структуре на рис. 6.3. ведущим является канал фазы A , который по составу функциональных блоков и принципу их действия не отличается от любого из каналов ранее рассмотренной многоканальной синхронной СИФУ (см. рис. 6.2). Импульсы управления в остальных каналах формируются при помощи счетной схемы, выполненной, например, на основе счетчика (CT), генератора счетных импульсов (G) и дешифратора (DC). При появлении на выходе ФИ1 переднего фронта импульса счетчик CT обнуляется и начинается счет импульсов с выхода генератора G . При достижении чисел N_1 , N_2 , соответствующих заданному интервалу времени, на выходе CT дешифратор DC последовательно запускает ФИ2–ФИ3 фаз B и C . Заданные интервалы времени, формируемые счетной схемой, зависят от силовой схемы выпрямления. Так для однофазных двухполупериодных схем заданный интервал времени соответствует 180 эл.град, для трехфазной нулевой – 120 эл.град, а для трехфазной мостовой – 60 эл.град. Синхронизаторы УС2–УС3 фаз B , C выполняют вспомогательную роль, связанную с распределением управляющих импульсов по тиристорам БСК, и в некоторых случаях могут отсутствовать. Угол регулирования определяется величиной сигнала управления $U_{упр}$ на входе ФСУ.

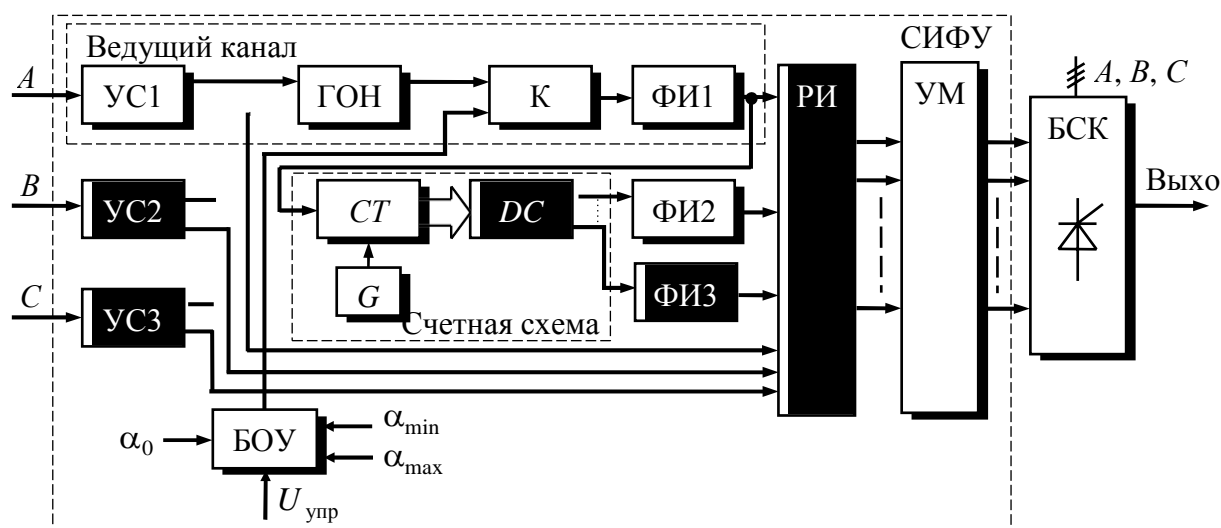


Рис. 6.2. Обобщенная функциональная схема одноканальной синхронной системы импульсно-фазового управления трехфазным нереверсивным ТП

Основным **преимуществом** одноканальных синхронных СИФУ по сравнению с многоканальными синхронными является высокая степень симметрии импульсов управления (менее 0,5 эл.град), подаваемых на тиристоры соответствующей группы БСК. Однако, очевиден и существенный **недостаток** таких систем, заключающийся в снижении динамических показателей СИФУ и ВП в целом, по той причине, что все последующие импульсы управления, начиная с базового $Y_{\phi 1}(t)$, формируются в параметрическом режиме, а не являются результатом активного сравнения опорного сигнала $Y_{оп}(t)$, формируемого ГОН, и сигнала управления $U_{упр}(t)$. В При синхронном принципе построения СИФУ для трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом этот же интервал дискретизации был бы равен $T/3$. Кроме того, одноканальные синхронные СИФУ накладывают жесткие требования к стабильности параметров напряжения сети.

В асинхронных СИФУ отсутствуют узлы синхронизации ФСУ с сетью, а регулирование длительности открытого состояния силовых ключей производится под действием сигнала рассогласования (разности) между сигналом управления и сигналом с выхода ДОС. В результате этого начальное положение импульса управления (угла α), в рамках отведенного диапазона регулирования, до включения ВП носит произвольный характер, что может привести к броску выходной координаты ВП, и, следовательно, накладывает жесткие требования на быстродействие контура обратной связи ВП. По этой причине асинхронные системы управления не получили широкого распространения для управления тиристорными преобразователями, а, главным образом, используются для управления, например, преобразователей постоянного напряжения, автономных инверторов напряжения, управляемых выпрямителей напряжения и будут рассмотрены более подробно в последующих главах. В состав асинхронных СУ (рис. 6.3.) обязательно входит модулятор (вместо ФСУ), состоящий из

генератора опорного напряжения ГОН и компаратора К. БСК таких СУ обязательно выполняется на полностью управляемых ключах, например, транзисторах или запираемых тиристорах, питание которых осуществляется от источника постоянного напряжения. Ключи БСК управляются от распределителя импульсов РИ, частота которых задается ГОН, например, пилообразной формы. Длительности открытого состояния силовых ключей регулируется за счет «вертикального» смещения сигнала развертки с выхода ГОН под действием сигнала рассогласования. Усиление импульсов управления осуществляется специальной схемой, которая в литературных источниках получила название драйвера. Типовые СИФУ по принципу управления делятся на системы с «вертикальным» и «горизонтальным» управлением.

В системах с «**вертикальным**» управлением сигнал развертки (или входной сигнал) смещаются друг относительно друга в вертикальной плоскости (рис. 6.3 а). При этом приращению $\Delta U_{упр}$ соответствует приращение $\Delta \alpha$ угла регулирования (длительности открытого состояния) ключами БСК.

В системах с «**горизонтальным**» управлением сигнал пилообразной развертки смещается относительно порогового значения «*b*» в горизонтальной плоскости (см. рис. 6.3 б), либо имеет зависимость от входного воздействия крутизну нарастающего фронта (см. рис. 6.3 в). В СИФУ с **программным управлением** ФСУ как таковое отсутствует, а угол управления БСК задается программным путем по заранее заданному закону регулирования.

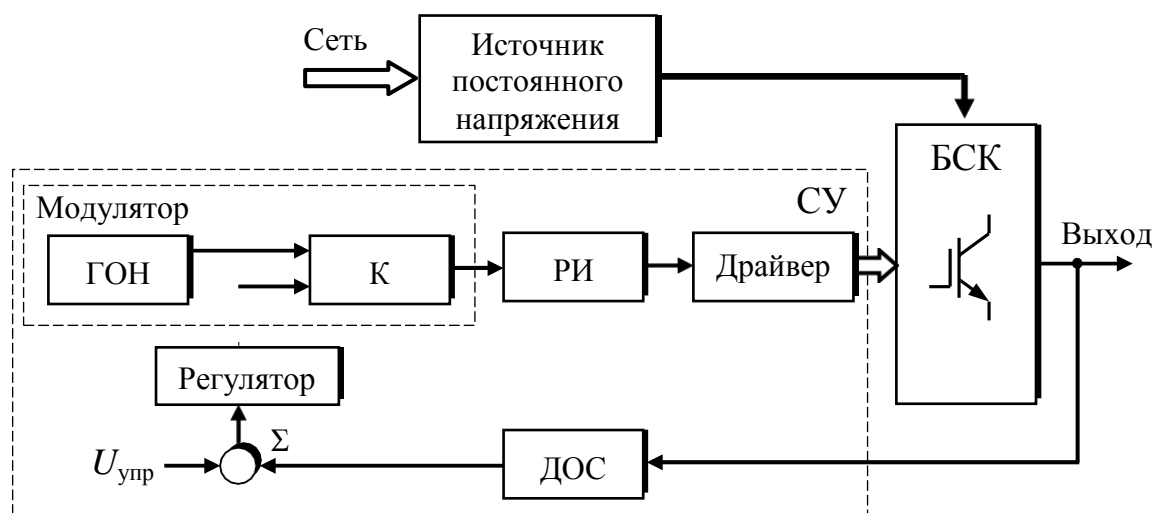


Рис. 6.3. Обобщенная функциональная схема асинхронной системы управления вентильным преобразователем

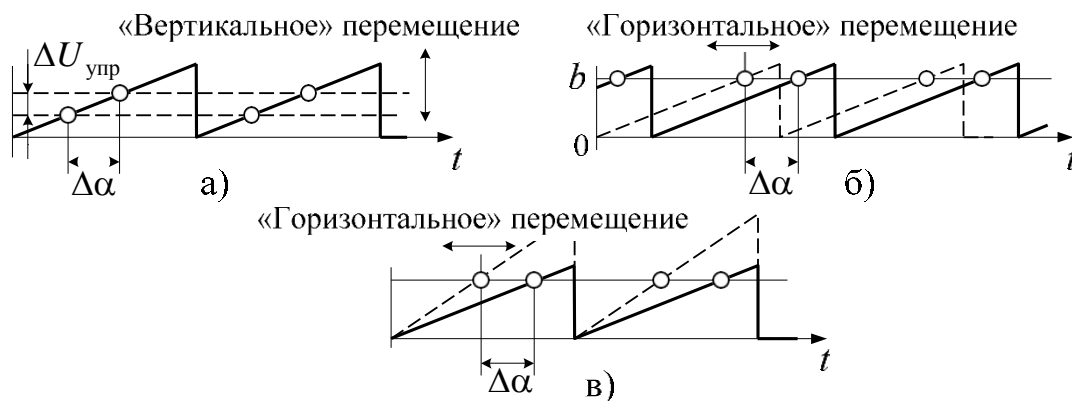


Рис. 6.4. Временные диаграммы сигналов при «вертикальном» (а) и «горизонтальном» (б, в) принципах управления СИФУ

По принципу построения БСК системы импульсно-фазового управления подразделяются на **нереверсивные** и **реверсивные**. В **нереверсивных ВП** выходное напряжение (ток) имеет только одну полярность. В **реверсивных ВП** выходная координата преобразователя может быть по знаку как положительной, так и отрицательной.

СИФУ принято различать по принципу обработки информации и подразделять на **аналоговые** и **цифро-аналоговые**.

В настоящее время большинство современных систем управления ВП реализуются программным способом на основе микроконтроллеров и чаще всего строятся по одноканальному синхронному принципу, несмотря на присутствие ему недостатки в отношении низкого быстродействия по сравнению с многоканальными синхронными системами управления. При этом, как правило, используется «вертикальный» принцип управления, в основе которого лежит развертывающее преобразование с выборкой мгновенных значений сигнала управления.

6.2. Требования, предъявляемые к системам импульсно-фазового управления, и формы управляющих импульсов

Система импульсно-фазового управления ТП должна создавать синхронизированную с напряжением сети систему импульсов, сдвигаемую во времени в зависимости от величины управляющего воздействия, с целью регулирования выходного напряжения (тока).

Требования, предъявляемые к СИФУ, определяются рядом факторов:

- 1) физическими процессами в полупроводниковых приборах,
- 2) особенностями самой схемы преобразователя,
- 3) особенностями нагрузки.

Таким образом, **СИФУ должна обеспечивать:**

1) достаточную амплитуду и ток управляющих импульсов, выбираемую для тиристоров по диаграмме управления;

2) достаточную крутизну управляющих импульсов (не менее 0,5 – 1,0 А/мкс). Крутизна особенно важна при параллельном и последовательном соединении тиристоров;

3) требуемый диапазон регулирования угла управления в зависимости от назначения преобразователей. Так, например, при активной нагрузке максимально возможный диапазон регулирования для однофазных выпрямителей должен составлять 180 эл.град, для трехфазного выпрямителя с нулевым выводом – 150 эл.град, для трехфазного мостового выпрямителя – 120 эл.град;

достаточную длительность управляющих импульсов: а) с точки зрения физики работы тиристора – 20 мкс; б) исходя из особенностей схемы, в трехфазной мостовой схеме требуется длительность импульсов более 60 эл.град, или нужно применять сдвоенные импульсы; в) исходя из особенностей нагрузки, при активно-индуктивной нагрузке с большой индуктивностью необходимо применять длинные импульсы (120 эл.град в трехфазных схемах);

4) гальваническое разделение выхода СИФУ и управляющего перехода силового тиристора;

5) достаточное быстродействие, чтобы за время до включения очередного тиристора в полном диапазоне сдвинулся управляющий импульс (не более 3...6 мс);

б) достаточную симметрию управляющих импульсов (допустимая не симметрия меньше 1 – 2 эл.град);

7) высокую помехоустойчивость как со стороны информационного входа, так и со стороны сети (СИФУ должна сохранять свою работоспособность в частотном диапазоне сигналов помех от 50 до 1200 Гц, допустимые коммутационные провалы напряжения сети 100% на 5 эл.град).

В СИФУ применяются управляющие импульсы малой и большой длительности, а также импульсы с высокочастотным заполнением (импульсный «пакет»).

Импульсы малой длительности (рис. 6.5 а), как правило, не превышают 20 эл.град. Сигналы управления **большой длительности** (см. рис. 6.5 б) имеют $t_{и}$ на уровне 120 эл.град, а их усилители мощности в первую очередь характеризуются высокими массогабаритными показателями импульсного трансформатора. Для устранения данного недостатка применяются **им-пульсы с высокочастотным заполнением** (см. рис. 6.7 в), когда в течение требуемого интервала времени $t_{и}$ на управляющий электрод вентиля подается «пакет», состоящий из серии высокочастотных импульсов длительностью t^* , зависящей от динамических характеристик тиристора.

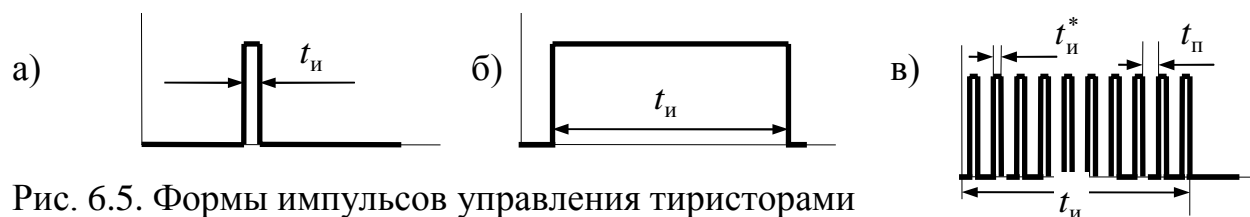


Рис. 6.5. Формы импульсов управления тиристорами

6.3. Системы управления и регулировочные характеристики реверсивных преобразователей при раздельном управлении

В реверсивных преобразователях имеется два комплекта вентиляей:

«Вперед» и «Назад». Особенность системы управления реверсивным преобразователем при раздельном управлении заключается в том, что СУ не должна позволять включиться другому комплекту вентиляей, пока ток проходит через предыдущий. Таким образом, переключение возможно только после перехода в прерывистый режим.

На рис. 6.6. приведена функциональная схема СУ реверсивным преобразователем с раздельным управлением. В качестве нагрузки используется двигатель постоянного тока. Измерение тока нагрузки осуществляется шунтом $R_{ш}$, включенным последовательно с двигателем. Импульсы управления силовыми тиристорами групп «Вперед» («В») и «Назад» («Н») подаются через ключи Кл. «В» и Кл. «Н», управляемые от логического переключающего устройства (ЛПУ), на информационные входы которого поступают логические сигналы с выхода датчика нулевого тока (ДНТ) и источника сигнала задания направления тока (вращения) электродвигателя (на рис.6.7. не показан). В случае отсутствия в СУ замкнутых контуров (например, по току якоря и скорости вращения двигателя) в качестве источника задания направления тока может быть использован сигнал управления $U_{упр}$. Вместо ДНТ в СУ реверсивными преобразователями часто применяют датчики проводимости (ДП), определяющие состояния вентиляей комплектов «В» и «Н» и передачу этой информации на логический вход ЛПУ. Таким образом, ЛПУ служит для выдачи разрешения и запрета на переключение комплектов вентиляей «В» и «Н» по сигналу ДНТ или ДП. Комплект, который должен включаться, определяется в зависимости от знака напряжения $U_{упр}$, подаваемого на ЛПУ. При работе группы «В» ключи Кл. «Н» закрыты, а при вступлении в работу тиристоров группы «Н» в неуправляемое состояние переходят ключи Кл. «В».

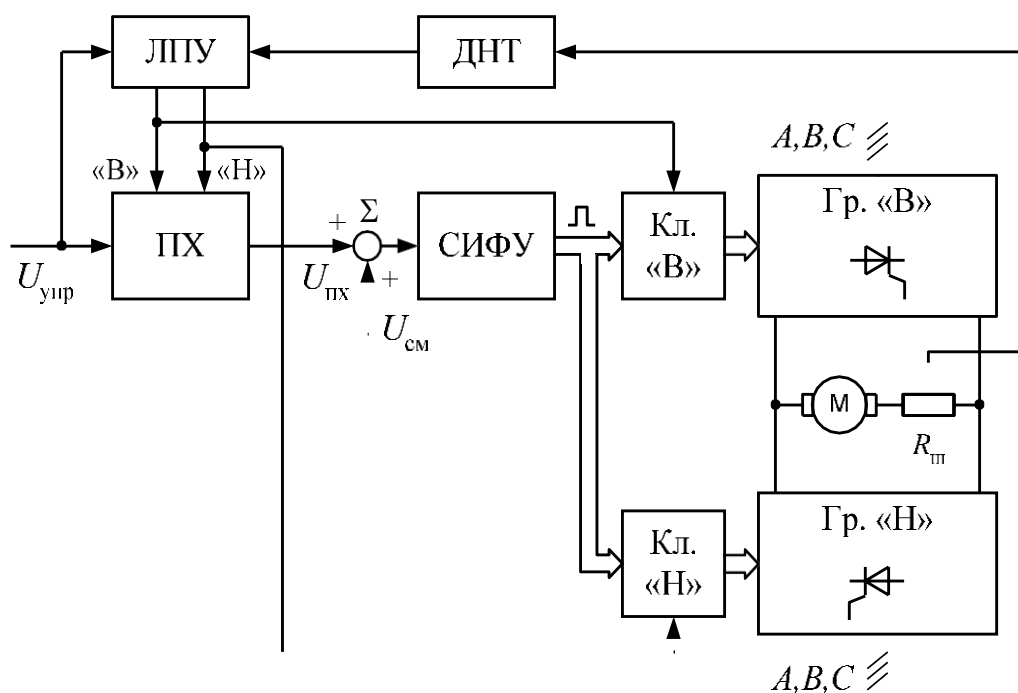


Рис. 6.6. Функциональная схема СУ реверсивного преобразователя с разделительным управлением

Блок СИФУ (см. рис. 6.6.) может быть выполнен как по многоканальному, так и одноканальному синхронному принципам. На входе СИФУ в реверсивных преобразователях с разделительным управлением обязательно устанавливают переключатель характеристики (ПХ), предназначенный для согласования по знаку сигнала управления $U_{упр}$ с входом СИФУ.

6.4. Цифровые и микропроцессорные системы управления

Повышение требований к автоматизированным электроприводам привело к широкому применению в них цифровых устройств, при этом используются как **аппаратные**, так и **программные** методы реализации требуемых алгоритмов управления.

Аппаратные методы построения цифровых систем близки к методам построения аналоговых систем управления: для выполнения каждой функции применяется отдельный элемент или группа элементов, и добавление новой функции требует введения новых элементов.

Системы управления, реализованные **аппаратными методами**, имеют высокое быстродействие, надежность; традиционные принципы их построения не вызывают трудностей при разработке и эксплуатации. В то же время они состоят из большого числа электронных компонентов, громоздки, имеют высокую стоимость и малую гибкость, требуют индивидуальной разработки функциональных модулей, образующих функционально законченную систему. Аппаратные системы управления обычно выполняются с применением микросхем малой и средней степени интеграции.

Развитие систем управления электроприводами характеризуется тенденциями

повышения степени интеграции элементов. Для массовых применений с относительно невысокими требованиями по точности эффективно применение специализированных, функционально законченных интегральных схем (ИС). Выпускается ряд ИС для непосредственного управления маломощными приводами. Эти ИС обеспечивают множество функций и позволяют легко создавать более дешевые по сравнению с дискретной реализацией системы.

Более гибкое решение базируется на **микроконтроллерах**. При этом происходит переход от «жесткой» логики алгоритмов управления к более гибкому управлению, максимально учитывающему требования конкретного применения и реализуемому программным способом. Применяемая для управления **микро-ЭВМ** состоит из центральной части (процессор и память) и ряда периферийных устройств, обеспечивающих связь микро-ЭВМ с управляемым объектом. Системы управления, реализованные на основе микро-ЭВМ, имеют меньшие габариты, чем реализованные с применением аппаратных методов, значительную гибкость, требуют небольшого числа функциональных модулей, однако обладают меньшим быстродействием, определяемым последовательным характером вычислений.

Микропроцессор (МП) представляет собой функционально законченное устройство, предназначенное для программной обработки цифровой информации, аналогичное по составу и структуре процессорам ЭВМ и выполненное с применением технологии больших интегральных схем (БИС). Микропроцессор состоит из одной или нескольких БИС и рассчитан на совместную работу с устройствами памяти и ввода-вывода. Обычно изготовители МП разрабатывают и производят другие БИС, образующие совместно с МП функционально законченный набор микросхем, предназначенный для построения микропроцессорной системы. Такой набор включает в себя собственно МП, оперативное и постоянное запоминающее устройство (ОЗУ и ПЗУ), микросхемы управления вводом-выводом и др.

На рис. 6.7. приведена функциональная схема системы микро-процессорного управления вентильным электроприводом постоянного тока. Эта система обеспечивает не только управление преобразователем, но и всем электроприводом. От устройства управления УУ, представляющего собой пульт или вычислительную машину более высокого уровня, сигналы задания поступают на микропроцессорный комплект (МПК). МПК включает в себя собственно микропроцессор, оперативное и постоянное запоминающее устройство (ОЗУ и ПЗУ), микросхемы управления вводом-выводом и др. От МПК управляющие импульсы подаются на вентильный блок ВБ через устройство связи с объектом УСО 1. УСО 1 (набор драйверов) служит для потенциальной развязки и формирования импульсов заданной мощности. На вход МПК кроме сигналов управления подаются сигналы обратных связей, синхронизации и других параметров состояния системы. Эти сигналы формируются с помощью датчиков сети ДС, датчиков вентильного блока ДВБ и датчиков электрической машины ДЭМ.

Между датчиками и МПК включено устройство связи с объектом УСО 2, обеспечивающее гальваническую развязку и преобразование сигналов. От МПК на УУ передается информация о состоянии системы.

Формирование фазового сдвига управляющих импульсов относительно

напряжения сети осуществляется программно с помощью алгоритма, реализующего «вертикальный» способ управления. При этом сравниваются не аналоговые величины, а цифровые коды.

Управление электроприводом осуществляется в реальном масштабе времени при наличии определенной многозадачности. Одновременное регулирование нескольких координат электропривода, диагностика функционирования системы, связь с другими объектами наиболее рационально организуются с помощью многоуровневой системы прерываний. Наибольший приоритет имеют сигналы аварийных ситуаций, вызывающие защитные процедуры, когда от времени реакции зависит дальнейшая работоспособность всей системы.

В значительном числе случаев электропривод работает не автономно, а в составе некоего технологического комплекса. Если процессорной мощности микроконтроллера достаточно для управления собственно электроприводом и одновременного решения задач технологического управления, то реализация технологического контроллера на базе микроконтроллера может потребовать некоторого дополнительного числа входов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и дискретных входов/выходов.

При применении микро-ЭВМ полностью меняется методика проектирования систем, разработчики и эксплуатационники должны владеть основами программирования, изменяются способы наладки систем, для наладки и эксплуатации необходимо специальное оборудование и т.п.

В настоящее время все современные электроприводы выпускаются с применением быстродействующих цифровых сигнальных процессоров с программным управлением. Поэтому будущее электропривода за цифровыми системами управления.

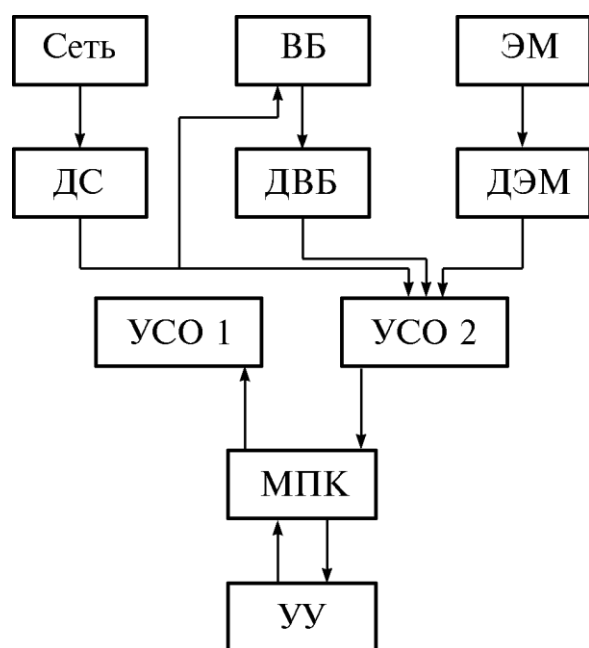


Рис.6.8. Функциональная схема системы микропроцессорного управления вентильным электроприводом постоянного тока

Глава 7. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

7.1. Классификация преобразователей постоянного напряжения

Преобразователи постоянного напряжения (ППН) предназначены для преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня с высоким КПД. Иногда их называют конверторами. Они служат для питания нагрузки постоянным напряжением U_n , отличающимся по величине от напряжения источника питания U_d .

По построению ППН делятся:

а) на **двухзвенные ППН**, состоящие из автономного инвертора (АИ), преобразующего постоянное напряжение в переменное, и выпрямителя. Трансформатор, стоящий между выпрямителем и АИ, позволяет получить на выходе напряжения как меньшие, так и большие входного.

б) на **непосредственные ППН**, выполненные на основе прерывателей.

Двухзвенные ППН чаще всего применяются в источниках питания систем управления и автоматики и будут рассмотрены позже.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение ППН?
2. Какие виды ППН вы знаете?

7.2. Непосредственные ППН

Понижающий ППН

На рис. 7.1 а показана схема непосредственного **ППН, понижающего напряжение**, а на рис. 7.1 б – диаграммы напряжений. Построения выполнены при допущении, что транзистор и диод идеальны, емкость конденсатора $C_f = \square$, а ток в цепи нагрузки непрерывен. Диод VD служит для пропускания тока, проходящего при выключении транзистора VT за счет энергии, запасенной в индуктивности нагрузки. Конденсатор C_f уменьшает потери в источнике питания, делая потребление энергии от него более постоянным. Если транзистор VT включается в момент t_1 , напряжение источника питания прикладывается к нагрузке (к нагрузке прикладывается импульс напряжения), а когда он выключается в момент t_2 , ток нагрузки протекает за счет энергии, запасенной в индуктивности L_n , и замыкается через диод VD . В момент t_3 процессы повторяются. Для регулирования напряжения на выходе ППН изменяют длительность включенного состояния транзистора. Регулирование напряжения, при котором частота подачи импульсов на нагрузку постоянна, но изменяется их длительность, называется **широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)**.

ППН, в которых применяется такой способ регулирования, называют **широтно-импульсными преобразователями (ШИП)**.

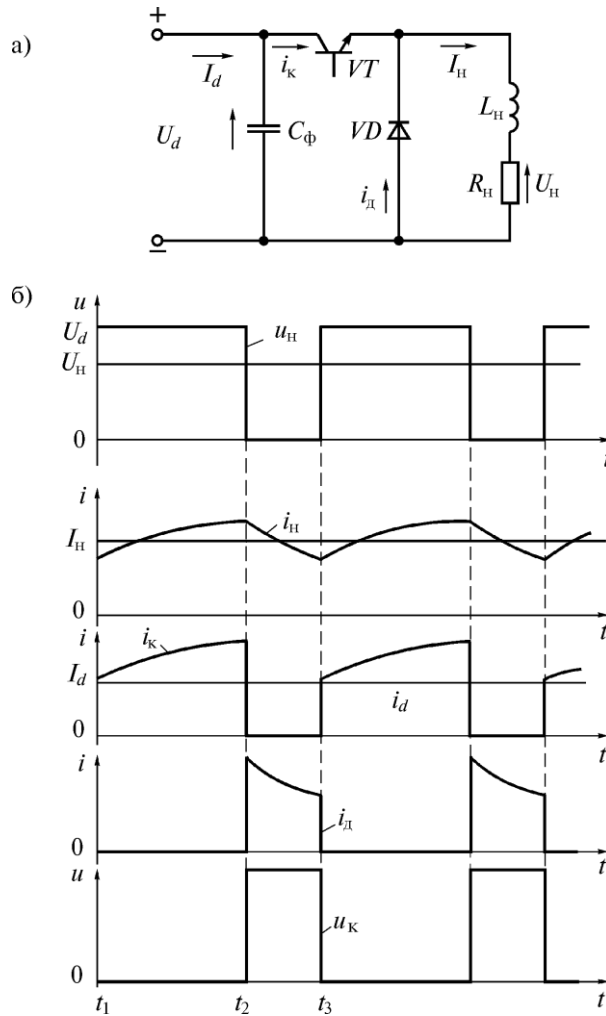


Рис. 7.1. Схема понижающего ППН (а) и диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие его работу (б)

Повышающий ППН

На рис. 7.2 а показана схема непосредственного ППН, **повышающего напряжение**, а на рис. 7.2 б – диаграммы напряжений. Рассмотрим работу схемы. В момент t_1 включается транзистор VT , ток через дроссель L нарастает. В момент t_2 выключается транзистор и за счет энергии, запасенной в индуктивности, под действием суммы напряжения источника питания U_d и ЭДС самоиндукции через вентиль VD заряжается конденсатор C_H , а ток, потребляемый от источника питания, спадает.

В момент t_3 процессы повторяются. В этой схеме, в отличие от предыдущей, можно только поднять напряжение.

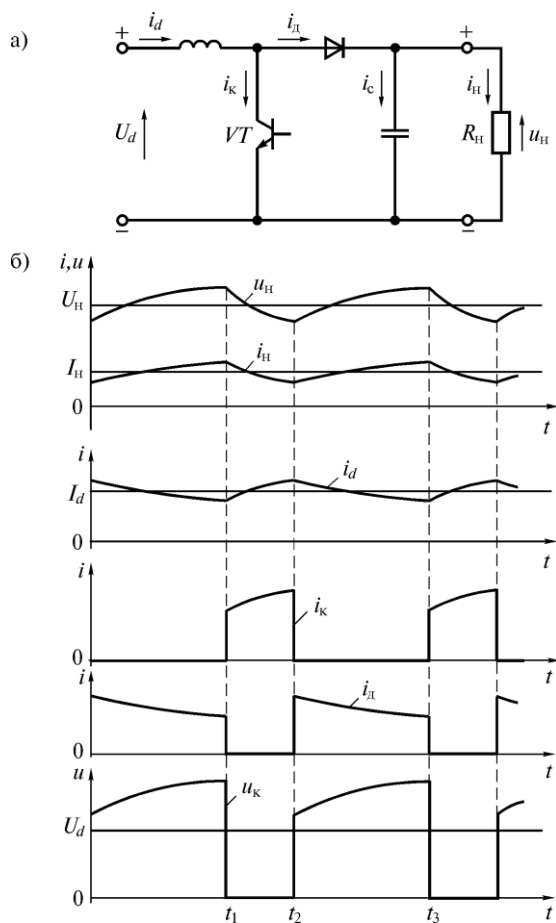


Рис. 7.2. Схема повышающего ППН (а) и диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие его работу (б)

Контрольные вопросы

1. Какие виды непосредственных ППН Вы знаете?
2. Что такое регулировочная характеристика ППН?
3. Что такое внешняя характеристика ППН?
4. Сравните различные виды непосредственных ППН.
5. В чем сходство между трансформатором и ППН?
6. Поясните по временным диаграммам процессы, происходящие в ППН.

Глава 8. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

8.1. Классификация и принципы построения автономных инверторов

Автономные инверторы (АИ) – это, как указывалось выше, преобразователи постоянного тока в переменный, которые работают на сеть, в которой нет других источников электроэнергии. Коммутации вентилях в них осуществляются благодаря применению полностью управляемых вентилях или устройств искусственной коммутации. При этом частота напряжения на выходе АИ определяется частотой управления, а величина напряжения – параметрами нагрузки и системой регулирования.

Автономные инверторы (АИ) классифицируются по ряду признаков.

1. По виду входного тока или напряжения АИ делятся:

а) на **автономные инверторы тока (АИТ)**. На входе АИТ действует источник тока, образованный источником ЭДС и большой индуктивностью, форма тока на выходе вентилях группы прямоугольная, а форма напряжения определяется характером нагрузки (рис. 8.1 а – б). Нагрузка может быть только активной или активно-емкостной, т.к. при активно-индуктивной нагрузке ток не может мгновенно изменить направление. Рассмотрим работу схемы при активно-емкостной нагрузке. В момент t_1 начинают проводить тиристоры $V1, V2$; в момент t_2 тиристоры $V1, V2$ выключаются, а тиристоры $V3, V4$ включаются. Ток через нагрузку меняет направление. Под действием проходящего тока напряжение на нагрузке изменяется по экспоненте;

б) на **автономные инверторы напряжения (АИН)**. На входе АИН действует источник ЭДС, напряжение на выходе вентилях группы прямоугольное, а форма тока определяется характером нагрузки. Напряжение на нагрузке переключается мгновенно, поэтому нагрузка может быть активной или активно-индуктивной (см. рис. 8.1 в – г). Рассмотрим работу схемы при активно-индуктивной нагрузке. В момент t_1 начинают проводить тиристоры $V1, V2$. Под действием приложенного напряжения ток нарастает по экспоненте. В момент t_2 тиристоры $V1, V2$ выключаются, но ток через нагрузку идет в том же направлении через диоды $VD3, VD4$ за счет энергии, запасенной в индуктивности, при этом напряжение на нагрузке уже изменило знак, а ток постепенно спадает. В момент t_3 ток равен нулю и включаются тиристоры $V3$ и $V4$, полярность напряжения при этом не меняется, а ток меняет направление. Диоды предназначены для возврата реактивной энергии в источник питания. Конденсатор C_d ее воспринимает;

в) на **резонансные (колебательные) автономные инверторы (РАИ)**. РАИ – это инвертор, на входе и на выходе вентилях группы которого ток прерывистый, а форма напряжения на выходе определяется нагрузкой (см. рис. 8.1 д – е). В РАИ должно выполняться условие:

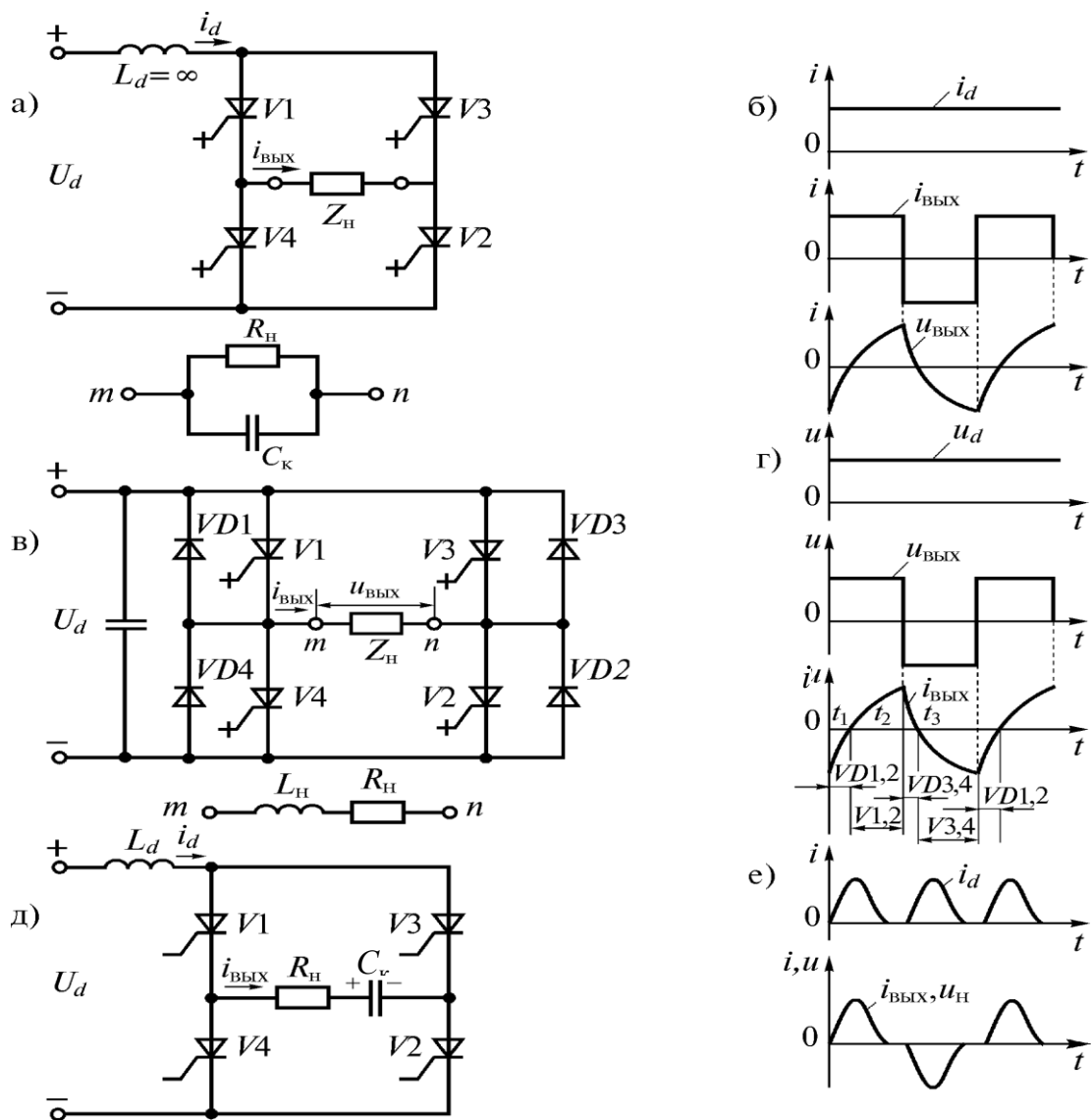


Рис.8.1. Принципиальные схемы идеальных автономных инверторов тока (а), напряжения (в), резонансного (д) и диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие их работу (б, г,е).

2. По применяемым вентилям АИ делятся:

а) на **АИ на вентилях с неполным управлением** (обычных тиристорах);

б) на **АИ на вентилях с полным управлением** (транзисторах и запираемых тиристорах).

3. По способу коммутации АИ на не запираемых тиристорах делятся:

а) на **АИ с одноступенчатой коммутацией**, в которых коммутация осуществляется с помощью коммутирующих конденсаторов основными вентилями схемы без применения дополнительных тиристоров;

б) на **АИ с двухступенчатой коммутацией**, в которых для коммутации применяются специальные коммутирующие вентили.

4. По месту включения коммутирующих конденсаторов АИ с одноступенчатой коммутацией делятся:

а) на **параллельные АИ** (коммутирующие конденсаторы включены параллельно нагрузке);

б) на **последовательные АИ** (коммутирующие конденсаторы включены последовательно с нагрузкой).

В электроприводе в настоящее время наибольшее применение находят АИН на IGBT транзисторах.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие ведомого и автономного инвертора?
2. По каким схемам могут выполняться автономные инверторы?
3. По каким признакам классифицируются автономные инверторы?
4. Чем отличается автономный инвертор напряжения от автономного инвертора тока?
5. На каких вентилях могут выполняться автономные инверторы?

8.2. Автономные инверторы на тиристорах с двухступенчатой коммутацией

На рис. 8.2. а приведена схема трехфазного мостового АИН с двухступенчатой коммутацией. Узел искусственной коммутации выполнен на тиристорах $V7$, $V8$ по схеме последовательного РАИ с закороченной нагрузкой. При поочередном включении вентилей $V7$, $V8$ на индуктивностях L_k появляются напряжения (см. рис. 8.2. б), которые включаются последовательно в цепь тиристоров $V1 - V6$, и в моменты, когда требуется выключить тиристоры, создают на них обратное напряжение. Вид выходного напряжения без учета процессов коммутации представлен на рис. 8.2 в.

8.3. Автономные инверторы напряжения на транзисторах и запираемых тиристорах

Однофазные транзисторные АИН

Автономный инвертор напряжения преобразовывает постоянное напряжение, подаваемое на его вход, в пропорциональное по величине переменное напряжение. Существует ряд схем однофазных АИН **на полностью управляемых вентилях** (транзисторах или запираемых тиристорах). На рис. 8.3. приведена однофазная мостовая схема и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие ее работу.

Пары транзисторов $V1$, $V2$ и $V3$, $V4$ образуют **диагонали** моста, а пары транзисторов $V1$, $V4$ и $V2$, $V3$ образуют **стойки** моста. При попарном включении транзисторов $V1$, $V2$ или $V3$, $V4$ знаки напряжения на нагрузке противоположны.

Рассмотрим подробнее процессы при работе АИН на активно-индуктивную нагрузку. При включении транзисторов $V1, V2$ с момента t_1 ток проходит по цепи $+, V1, R_H, L_H, V2, -$ источника питания. После выключения транзисторов $V1, V2$ в момент t_2 управляющие импульсы подаются на транзисторы $V3, V4$, но они не могут включиться, так как ток в индуктивности не может мгновенно изменить направление. Поэтому, после выключения транзисторов $V1, V2$ ток проходит по цепи $L_H, VD3$, источник питания, $VD4, R_H$. Энергия, запасенная в индуктивности нагрузки, возвращается в источник питания. После спада тока до нуля в момент t_3 открываются транзисторы $V3, V4$ и ток в нагрузке меняет направление. Далее процессы идут аналогично.

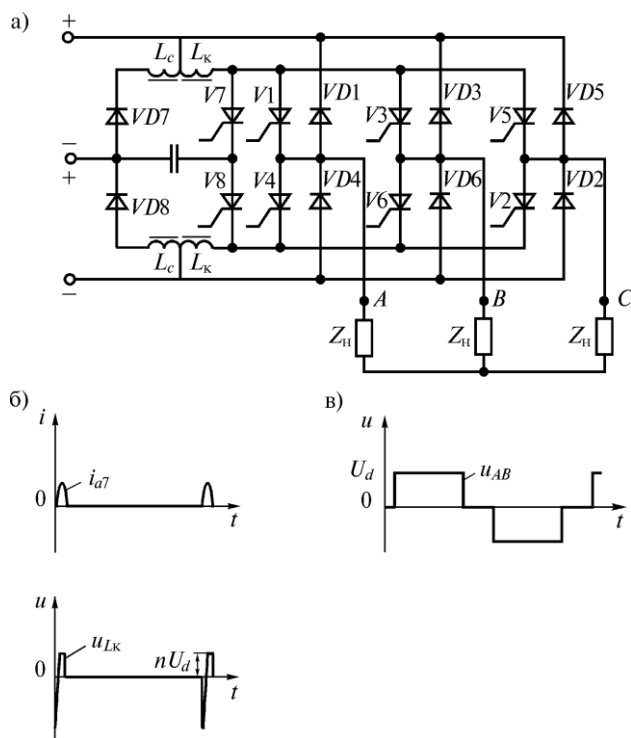


Рис. 8.2. Трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения с двухступенчатой коммутацией и общим коммутирующим устройством (а), диаграммы напряжения и тока в коммутирующем устройстве (б) и диаграммы линейного напряжения (без учета коммутационных процессов) (в)

Конденсатор C_d на входе является обязательным элементом АИН.

Он имеет двойное назначение. Здесь только напомним, что он **обеспечивает постоянное потребление энергии от источника питания** даже при запертом состоянии ключей и **защищает полупроводниковые элементы от перенапряжений**, возникающих на соединительных проводах между источником питания и блоком вентилях. **Он должен быть включен как можно ближе к блоку вентилях.**

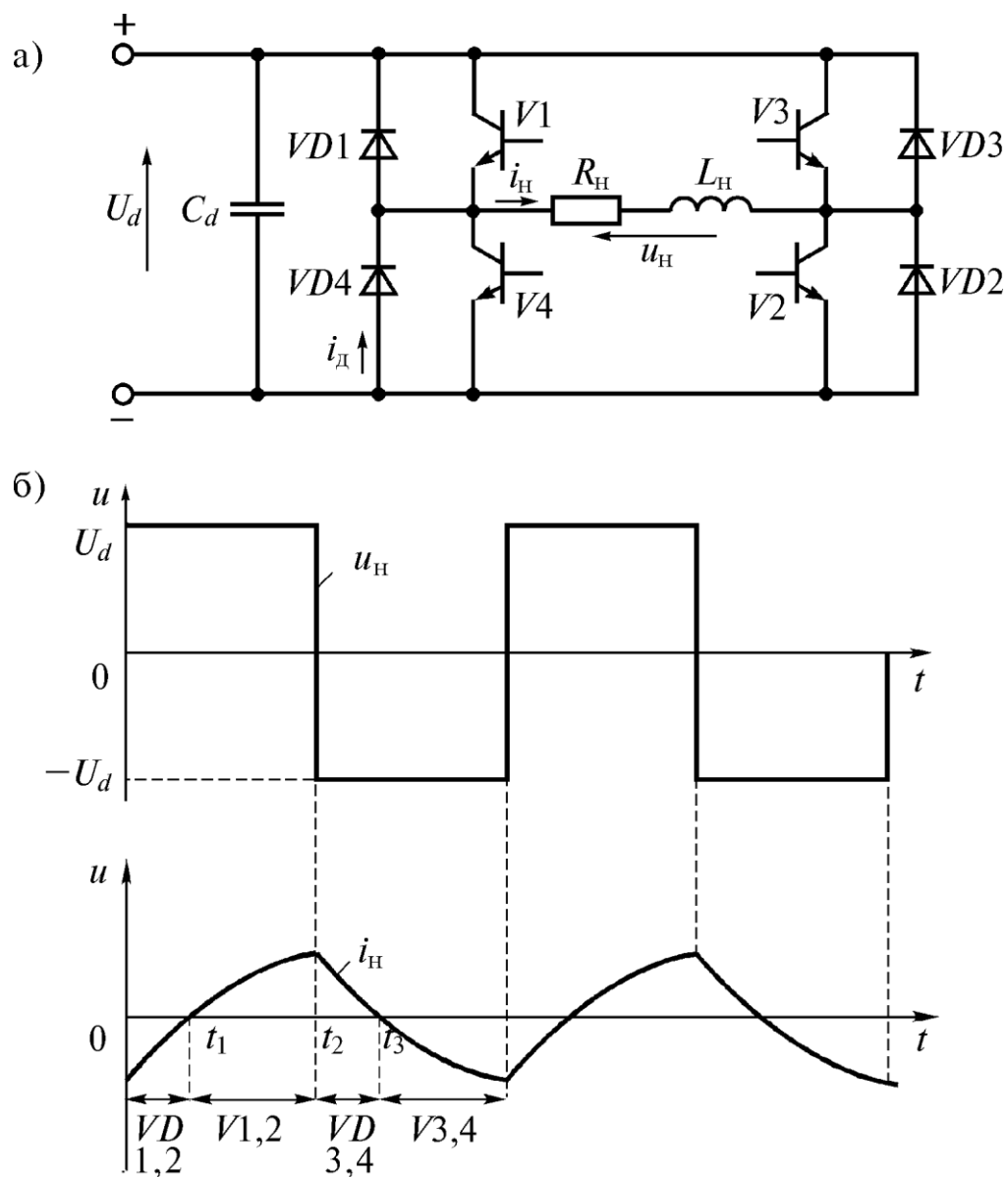


Рис. 8.3. Однофазный мостовой АИН (а) и диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие его работу.

На рис. 8.4. приведена схема АИН с разделенным (симметричным) источником питания и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие ее работу. Средняя точка источника питания (ноль источника питания) может быть искусственной, то есть созданной одинаковыми резисторами или конденсаторами.

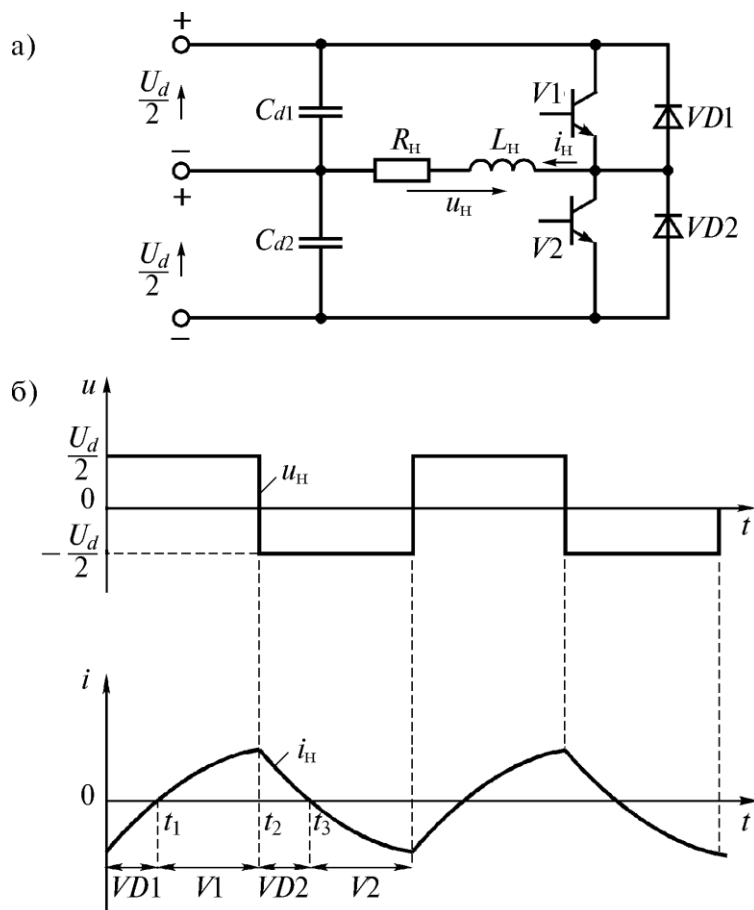


Рис.8.4. Схема АИН с отдельным источником питания (а) и диаграммы напряжения и тока иллюстрирующие его работу (б).

При включении транзистора $V1$ с момента t_1 ток проходит по цепи $+$, $V1$, $L_{н}$, $R_{н}$, средняя точка источника питания. После выключения транзистора $V1$ в момент t_2 управляющий импульс подается на транзистор $V2$, но он не может включиться, так как ток в индуктивности не может мгновенно изменить направление. Поэтому, после выключения транзистора $V1$ ток проходит по цепи $L_{н}$, $R_{н}$, нижняя половина источника питания $VD2$. Энергия, запасенная в индуктивности нагрузки, возвращается в источник питания. После спада тока до нуля в момент t_3 открывается транзистор $V2$, и ток в нагрузке меняет направление. Далее процессы идут аналогично.

Как видно из сравнения рис. 8.3 б и рис. 8.4. б временные диаграммы одинаковы по форме и отличаются амплитудой напряжения.

8.4.Трехфазный мостовой АИН

Автономный инвертор напряжения преобразовывает постоянное напряжение, подаваемое на его вход, в пропорциональное по величине переменное напряжение. Существует много схем АИН. Однако, наибольшее применение в электроприводе переменного тока получила **трехфазная мостовая схема на полностью управляемых вентилях** (транзисторах или запираемых тиристорах), приведенная на рис. 8.5.

В этой схеме управляемые вентили могут работать с длительностью открытого состояния $\lambda = 120^\circ$ и $\lambda = 180^\circ$. При угле проводимости вентилей $\lambda = 180^\circ$ обеспечивается непрерывная связь фаз нагрузки с источником питания и лучшая форма напряжений на выходе, независимая от параметров нагрузки. Это обусловило более широкое применение такого управления.

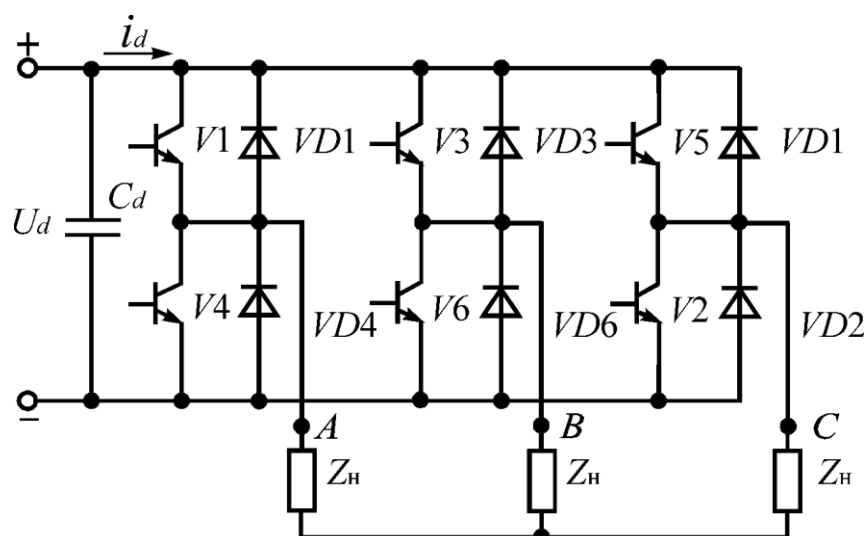


Рис.8.5. Транзисторный трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения при соединении нагрузки звездой.

Контрольные вопросы

1. Назовите схемы однофазных транзисторных АИН?
2. Каков угол проводимости транзисторов в трехфазных АИН?
3. Покажите пути токов в трехфазных АИН.
4. Как формируются фазные и линейные напряжения в трехфазных АИН?
5. Как изменяются пути токов при коммутации транзисторов и разных коэффициентах мощности нагрузки?
6. Какие допущения принимаются при расчете трехфазных АИН?

Регулирование величины и формы напряжения в АИН

Импульсная модуляция в АИН

Регулирование напряжения на выходе АИН может осуществляться с помощью импульсной модуляции. Из импульсных методов регулирования выходного напряжения наибольшее распространение получили **широотно-импульсное регулирование (ШИР)** и **широотно-импульсная модуляция (ШИМ)**. Частота модуляции (**несущая частота**) должна быть хотя бы на порядок выше, чем наибольшая частота выходного напряжения. Модуляция при ШИМ и ШИР осуществляется подачей на вход системы управления **напряжения управления (модулирующего напряжения)** определенной формы. Это напряжение сравнивается с пилообразным **опорным напряжением (развертывающим напряжением)**. При изменении амплитуды модулирующего напряжения изменяется величина выходного напряжения. При **ШИР** кривая выходного напряжения инвертора формируется в виде серии импульсов определенной частоты и одинаковой амплитуды и длительности. Регулирование напряжения осуществляется изменением относительной длительности импульсов. На рис. 8.6. а показан вид напряжения u_H на выходе однофазных АИН, выполненных по однофазной мостовой схеме или схеме с разделенным источником питания. При **широотно-импульсной модуляции (ШИМ)** одновременно обеспечивается регулирование напряжения на выходе АИН и изменение его по квазисинусоидальному закону. На рис. 8.6. б показан вид напряжения u_H на выходе однофазных АИН, выполненных по однофазной мостовой схеме или схеме с разделенным источником питания импульсов переменной длительности, модулированных чаще всего по синусоидальному закону. Регулирование напряжения осуществляется изменением длительности импульсов при сохранении закона модуляции. Там же показана гладкая составляющая $u_{нг}$, полученная усреднением средних значений напряжения за период модуляции. Она оказывается синусоидальной и повторяет форму управляющего (модулирующего) напряжения. По существу это первая гармоника напряжения. Модуляция может быть **синхронной**, когда несущая частота кратна частоте управления и изменяется одновременно с ней. При **асинхронной** модуляции несущая частота неизменна при изменении частоты управления, но всегда хотя бы на порядок выше наивысшей частоты управления. Наиболее широко применяется асинхронная модуляция. Опорное напряжение при импульсной модуляции в автономных преобразователях всегда имеет пилообразную форму.

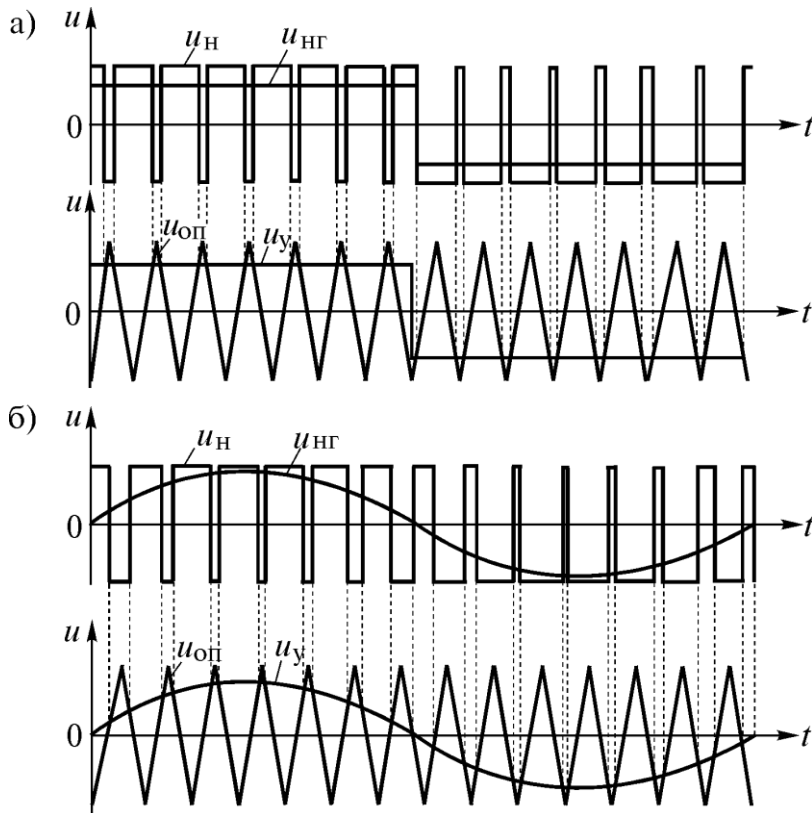


Рис.8.6. Диаграммы напряжений на нагрузке (U_H) опорного ($U_{оп}$) и управляющего ($U_у$) в однофазном мостовом инверторе напряжения при ШИР (а) ШИМ (б).

Модуляция может быть **синхронной**, когда несущая частота кратна частоте управления и изменяется одновременно с ней. При **асинхронной** модуляции несущая частота неизменна при изменении частоты управления, но всегда хотя бы на порядок выше наивысшей частоты управления. Наиболее широко применяется асинхронная модуляция. Опорное напряжение при импульсной модуляции в автономных преобразователях всегда имеет пилообразную форму.

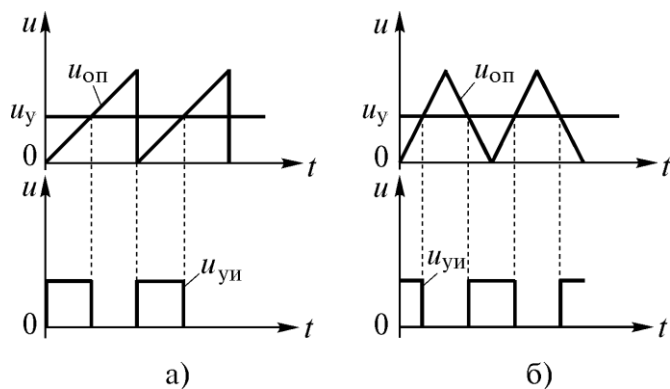


Рис.8.7. Формирование времени задержки.

Однако форма «пилы» может быть разной. В зависимости от формы «пилы» модуляция управляющего импульса происходит по переднему фронту как показано на рис.8.7. а, или аналогично по заднему фронту. Такая модуляция обычно применяется в однофазных схемах и в преобразователях постоянного напряжения.

В трехфазных АИН для исключения одновременного переключения транзисторов в разных фазах применяют модуляцию по обоим фронтам. Эту ШИМ называют **центрированной** (см. рис. 8.7. б).

Из рис.8.7. видно, что при выключении одного транзистора сразу подается сигнал на включение противофазного. При этом возможно короткое замыкание источника питания на время переходного процесса переключения транзисторов. Для исключения возникающего при этом выброса тока применяют задержку включения очередного транзистора.

8.5.Сравнение автономных инверторов

Наибольшие частоты в тиристорных АИ могут быть получены при применении резонансных АИ. Они получили применение в электротермии и электротехнологии.

Автономные инверторы тока выполняются на тиристорах и применимы в электроприводе переменного тока, но в последнее время это направление мало развивается в связи с недостатками АИТ и бурным развитием транзисторов.

АИН имеют наилучшие внешние и регулировочные характеристики. Применение ШИМ в АИН позволяет формировать на выходах достаточно синусоидальные токи и напряжения. При отсутствии ШИМ максимальное действующее напряжение на вы-

ходе трехфазного АИН ($U_{нл} = 0,816U_d$, $U_{нл(1)} = 0,78U_d$), но в нем очень

велико содержание высших гармоник (3, 5, 7 и т.д.). Амплитуды пятой и седьмой гармоник составляют 20 и 14% от амплитуды основной гармоники. Регулирование выходного напряжения возможно только регулированием напряжения источника питания. Коммутационные потери в транзисторах минимальные. При формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора максимальное напряжение на нагрузке меньше, чем без модуляции (без ШИМ). Система управления наиболее сложная, практически реализуется только на микроконтроллерах. Формирование средних напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания уменьшает максимальное напряжение на нагрузке по сравнению с предыдущим способом.

При формировании фазных токов максимальные напряжения и потери близки к соответствующим показателям при формировании фазных напряжений.

Способ формирования фазных напряжений с помощью пространственного вектора вызывает меньшие коммутационные потери в транзисторах, чем другие способы ШИМ, так как количество переключений ключей при данном способе управления сокращается с шести до четырех на каждом периоде ШИМ.

Очень малые времена переключения силовых транзисторов в АИН с ШИМ

приводят к большим скоростям изменения напряжения и токов. Поэтому в системе АИН–двигатель стали проявляться новые явления. Кабель, соединяющий АИН с двигателем, следует рассматривать как цепь с распределёнными параметрами. В таких цепях при неблагоприятных сочетаниях параметров импульсов напряжения и длины кабеля возникают **волновые процессы**, приводящие к возникновению перенапряжений. Напряжение на обмотках двигателя может достигать двойной величины по сравнению с напряжением источника питания.

АИН на IGBT-транзисторах в настоящее время являются наиболее перспективным видом АИ при малых и средних мощностях. При больших мощностях вместо них применяют **IGCT-тиристоры**.

Глава 9. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

9.1. Классификация и принципы построения преобразователей частоты

Преобразователи частоты (ПЧ) предназначены для преобразования переменного напряжения одной частоты в переменное напряжение другой частоты. Преобразователи частоты для частотно-регулируемых электроприводов преобразуют электроэнергию, поступающую из сети переменного тока, в электроэнергию с меняющейся по заданным законам частотой и напряжением. Преобразователи частоты по построению могут быть разбиты на два типа:

- а) двухзвенные преобразователи частоты (ДПЧ);**
- б) непосредственные преобразователи частоты (НПЧ).**

В ДПЧ первое звено представляет собой выпрямитель (управляемый или неуправляемый) с фильтром на выходе, а второе – автономный инвертор. Таким образом, нагрузка связана с сетью через два звена, и происходит двукратное преобразование энергии. Второе звено в ДПЧ может быть выполнено как на основе автономного инвертора напряжения (АИН), так и на основе автономного инвертора тока (АИТ).

ДПЧ позволяют получить на выходе частоты как меньшие, так и большие входных. Их недостаток – двойное преобразование энергии, ведущее к увеличению потерь.

НПЧ выполняются на основе реверсивных преобразователей. Однофазный НПЧ представляет собой двухкомплектный реверсивный преобразователь, на выходе которого подключена нагрузка. Каждый комплект вентиля пропускает одну полуволну тока. Трёхфазный НПЧ представляет собой три реверсивных преобразователя, каждый из которых питает одну фазу нагрузки.

НПЧ позволяют получить на выходе частоты, только меньшие входных. В НПЧ происходит однократное преобразование энергии.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение ПЧ?
2. Каково построение ДПЧ?
3. Каково построение НПЧ?

9.2. Двухзвенные преобразователи частоты Функциональные схемы ДПЧ

Двухзвенный преобразователь частоты на основе АИН содержит выпрямитель, сглаживающий фильтр и АИН (рис. 9.1).

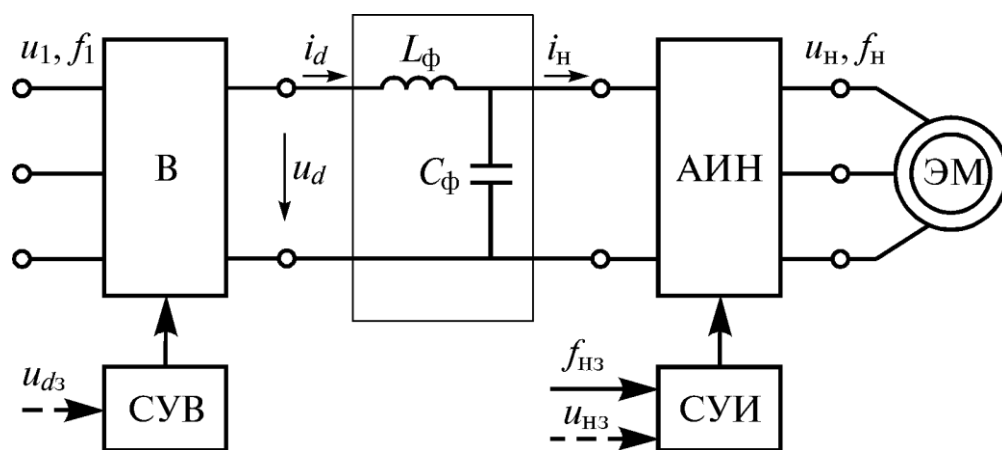


Рис.9.1. Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты на основе АИН, работающего на двигатель переменного тока. (В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения; ЭМ – электрическая машина; СУВ, СУИ – системы управления выпрямителем и автономным инвертором. Штриховой линией показаны воздействия и связи, которые могут отсутствовать)

Сглаживающий фильтр обычно представляет собой Г-образный LC - фильтр. Выпрямитель может быть управляемым и неуправляемым, если функции регулирования напряжения возлагаются на АИН. Если требуется рекуперация энергии в питающую сеть, то выпрямитель превращается в двухкомплектный реверсивный преобразователь, обеспечивающий двухсторонний энергообмен. Рекуперация энергии в питающую сеть возможна также, если вместо тиристорного двухкомплектного реверсивного преобразователя включить второй АИН, который используется в качестве обратимого преобразователя напряжения. **Регулирование напряжения на выходе ПЧ на основе АИН может осуществляться как с помощью управляемого выпрямителя, так и с помощью АИН с импульсной модуляцией.** Из импульсных методов регулирования

выходного напряжения наибольшее распространение получили широтно-импульсное регулирование (ШИР) и широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Частота модуляции должна быть хотя бы на порядок выше, чем наибольшая частота выходного напряжения. Частота выходного напряжения задается системой управления.

Двухзвенный преобразователь частоты на основе АИТ содержит управляемый выпрямитель, индуктивный сглаживающий фильтр и АИТ (рис.9.2).

Управление амплитудой выходного тока осуществляется с помощью управляемого выпрямителя, управление частотой выходного тока – частотой подачи управляющих импульсов на тиристоры автономного инвертора.

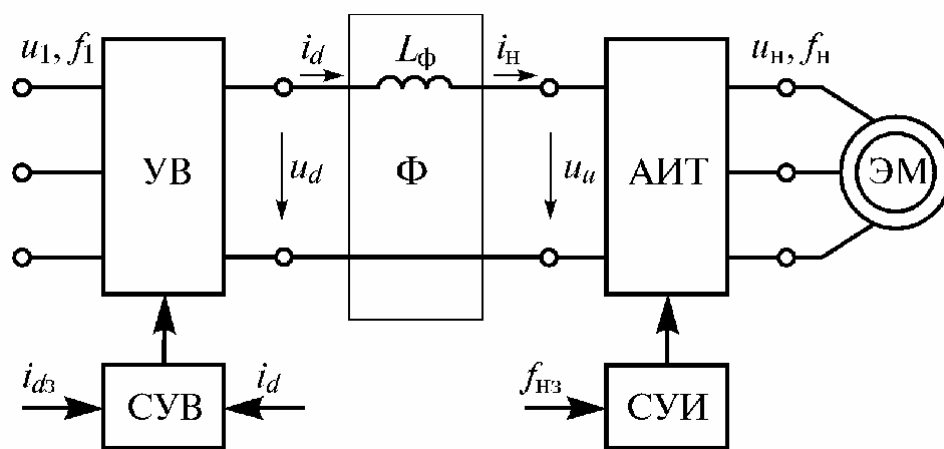


Рис.9.2. Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты на основе АИТ, работающего на двигатель переменного тока. (УВ – управляемый выпрямитель; Ф – фильтр; АИТ – автономный инвертор тока; ЭМ – электрическая машина; СУВ, СУИ – системы управления выпрямителем и автономным инвертором).

9.3. ДПЧ на основе управляемого выпрямителя и АИН

На рис. 9.3 приведена схема двухзвенного преобразователя частоты для питания асинхронного двигателя. Он состоит из управляемого выпрямителя (В), автономного инвертора (АИН), сглаживающего фильтра (СФ) и блока тормозного резистора (БТР), применяемого при торможении.

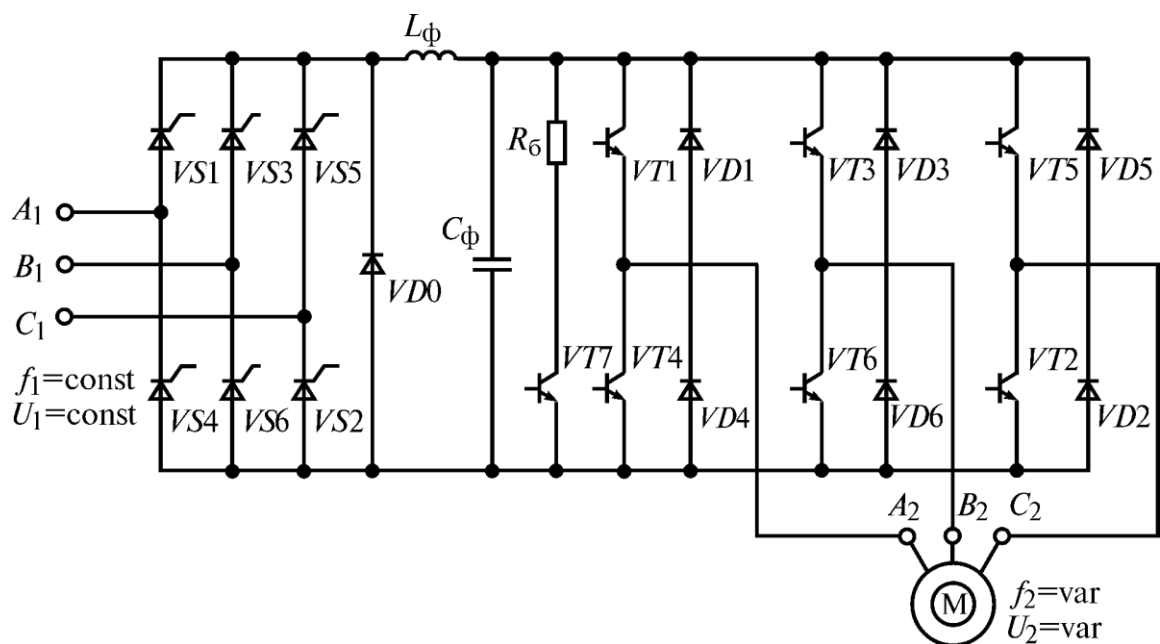


Рис. 9.3. Двухзвенный транзисторный преобразователь частоты, обеспечивающий регулирование скорости и торможение асинхронного двигателя.

Управляемый выпрямитель выполнен на тиристорах $VS1 - VS6$, автономный инвертор на транзисторах $VT1 - VT6$. Фильтр $L_\phi C_\phi$ служит для сглаживания напряжения выпрямителя. Диоды $VD1 - VD6$ служат для пропуска тока при выключении транзисторов. Одновременно они играют роль обратного выпрямителя при торможении двигателя. Регулирование напряжения на выходе ПЧ осуществляется с помощью управляемого выпрямителя. Диод $VD0$ ставится для повышения коэффициента мощности выпрямителя при глубоком регулировании.

Торможение обеспечивается путем включения параллельно конденсатору фильтра цепи, содержащей тормозной резистор R_6 и транзистор $VT7$. Если напряжение на конденсаторе превышает заданное значение, транзистор $VT7$ включается и энергия, передаваемая от электрической машины, рассеивается в тормозном резисторе. При этом выпрямитель на входе ПЧ выполняется однокомплектным.

Недостатки данного ПЧ – невозможность рекуперации энергии в сеть при торможении, ухудшение коэффициента мощности при регулировании, большее содержание гармоник в выходном напряжении и наличие двух систем управления преобразователями. Если выпрямитель на входе ПЧ выполнить двухкомплектным, то становится возможным рекуперативное торможение. В настоящее время эта схема является устаревшей.

9.4. ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ

На рис. 9.4 приведена схема двухзвенного преобразователя частоты для питания асинхронного двигателя. Он состоит из неуправляемого выпрямителя (В), автономного инвертора (АИН), сглаживающего фильтра (СФ) и блока тормозного резистора (БР), применяемого при торможении.

Неуправляемый выпрямитель выполнен на диодах $VD7 - VD12$, автономный инвертор на транзисторах $VT1 - VT6$, шунтированных диодами $VD1 - VD6$. Диоды служат для пропускания тока при выключении транзисторов. Одновременно они играют роль обратного выпрямителя при торможении двигателя. Фильтр $L_\phi C_\phi$ служит для сглаживания напряжения выпрямителя. За счет применения ШИМ осуществляется регулирование напряжения на выходе ПЧ и приближение его формы к синусоидальной.

Торможение обеспечивается переводом АИН в режим управляемого выпрямителя напряжения, обеспечивающего повышение напряжения на конденсаторе фильтра, несмотря на уменьшение скорости вращения двигателя. Роль фазных индуктивностей при этом выполняют индуктивности рассеяния фаз двигателя. При превышении напряжением на конденсаторе заданного значения транзистор $VT7$ включается и энергия, передаваемая от электрической машины, рассеивается в тормозном резисторе

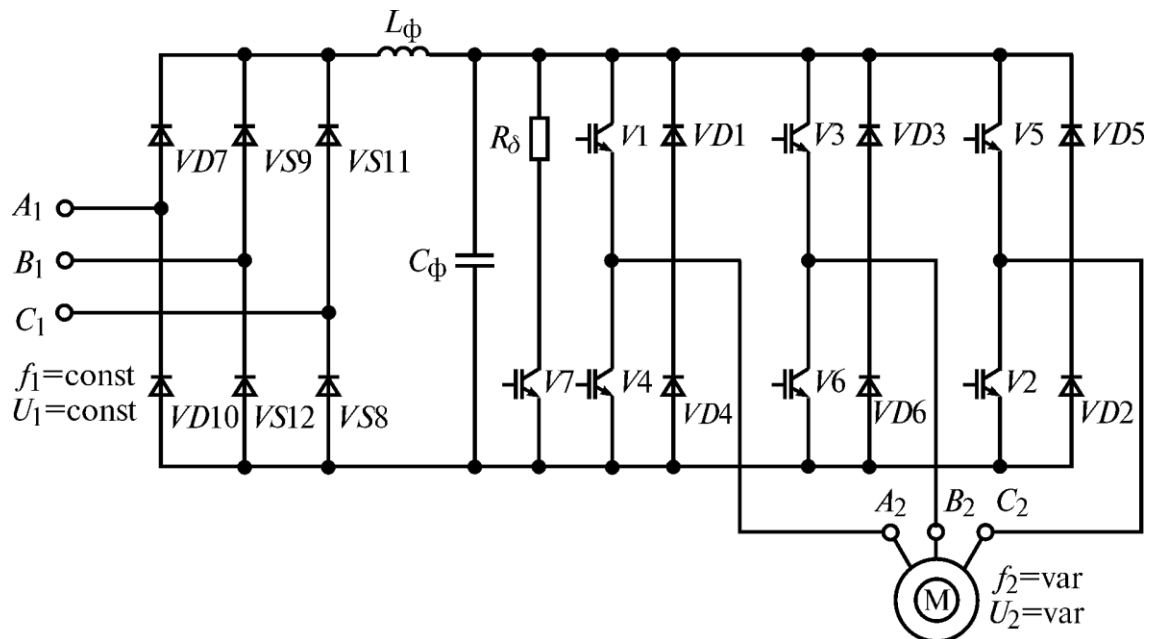


Рис.9.4. Двухзвенный транзисторный преобразователь частоты с ШИМ, обеспечивающий регулирование скорости и торможение асинхронного двигателя.

Описанное торможение получило в литературе название **инверторного торможения**, хотя очевидно, что при этом торможении не происходит инвертирования. Термин **динамическое торможение** является в системах с асинхронными двигателями занятым, так как под ним понимается пропускание постоянного тока через обмотки двигателя.

В настоящее время в таких ПЧ обычно применяются силовые модули, содержащие один или несколько ключей, выполненных на БТИЗ шунтированных диодами.

Недостаток такого ПЧ – невозможность рекуперации энергии в сеть при торможении. **В настоящее время эта схема наиболее перспективна в электроприводах с редкими торможениями.**

9.5. Рекуперирующий ДПЧ на основе ОПН

Для обеспечения рекуперации энергии в двухзвенном ПЧ на основе АИН на входе можно включить дополнительный комплект тиристоров, работающий в инверторном режиме. Однако на инвертирующий комплект вентиляей необходимо подавать повышенное напряжение с помощью дополнительного трансформатора, либо не допускать работу выпрямителя с углом меньшим α_{\min} .

На рис. 9.5 приведена схема ДПЧ, **обеспечивающего передачу**

энергии в обоих направлениях – от питающей сети к двигателю и от электрической машины в генераторном режиме в сеть. Такие ДПЧ получили название **четырёхквadrантных**, так как их внешние характеристики расположены во всех квадрантах.

Схема содержит два обратимых преобразователя напряжения (ОПН). ОПН1 на стороне сети в основном работает в выпрямительном режиме, когда энергия из сети через второй ОПН, работающий в инверторном режиме, передается к двигателю. При торможении ОПН2, подключенный к двигателю переходит в выпрямительный режим, а ОПН1, подключенный к сети, в инверторный режим. При этом происходит рекуперация энергии в сеть. Если задать схеме управления на входе $\cos\varphi = \pm 1$, то во всех режимах при регулировании и торможении двигателя из сети будет потребляться или в сеть будет отдаваться практически только активная мощность, а ток будет практически синусоидален, что определяет минимальное вредное влияние на питающую сеть. **Эти преобразователи на сегодняшний день являются самыми близким к идеальным.** На рис. 9.6 приведена функциональная схема рекуперирующего ДПЧ с регулируемым коэффициентом мощности.

В схеме имеются следующие элементы: ОПН1, подключенный к сети, ОПН2, подключенный к двигателю, датчики тока и напряжения ДТ1 и ДН1 на стороне сети и ДТ2 и ДН2 на стороне постоянного напряжения. Требуемая мощность на стороне постоянного тока определяется измерением сред- них значений U_d и I_d , а затем и мощности P_d с помощью вычислителя ВМ, куда поступают сигналы с ДН2 и ДТ2 через фильтр Ф. По действующему значению напряжения сети U_1 , определенному с помощью вычислителя напряжения ВН, и с учетом заданного угла φ_1 определяется ток $I_{1\text{зад}}$, обеспе- чивающий заданную мощность. Блок ФСН формирует синусоидальное

напряжение, повторяющее напряжение сети, а блок « φ_1 » формирует заданную синусоиду с учетом фазового сдвига φ_1 . В блоке «ЗАД i_1 » формируется заданная синусоида тока. В модуляторе М она сравнивается с сигналом датчика тока ДТ1 i_1 , и формируются управляющие импульсы, которые через усилитель мощности УМ поступают на транзисторы. Блок НТ определяет направление тока (выпрямительный или инверторный режим). Блок выбора режима ВР в соответствии с сигналом от НТ задает угол φ_1 .

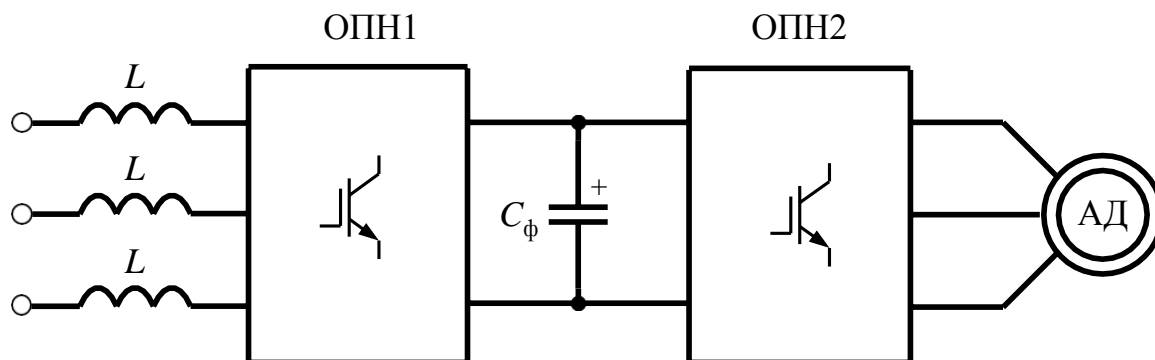


Рис.9.5. Схема рекуперирующего ДПЧ.

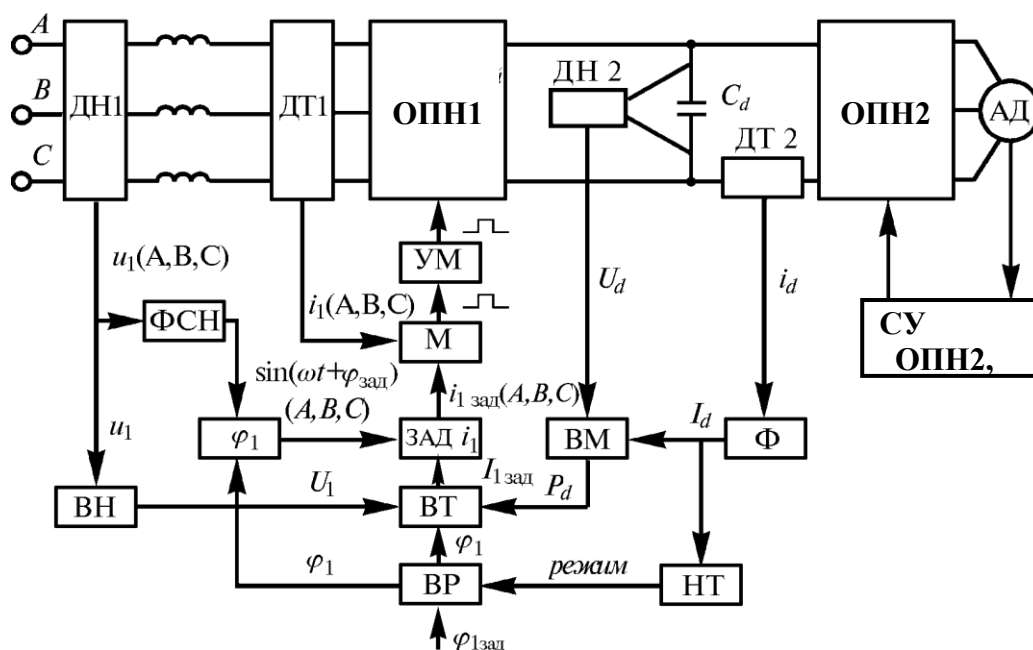


Рис.9.6. Функциональная схема рекуперирующего ДПЧ с регулируемым коэффициентом мощности.

Преимущества двухзвенного рекуперирующего ПЧ: независимость выходной частоты от входной, возможность получения высокого коэффициента мощности на стороне сети.

9.6. Рекуперирующие ДПЧ на основе инверторов тока

На рис. 9.7 приведена схема двухзвенного преобразователя частоты для питания асинхронного двигателя, выполненного на базе АИТ. Автономный инвертор тока, преобразовывает постоянный ток, подаваемый на его вход, в пропорциональный по величине переменный ток. Режим источника тока на входе обеспечивается за счет большой индуктивности L и применения токо-стабилизирующей обратной связи, поддерживающей заданное значение тока I_{d3} . АИТ выполнен по схеме с отсекающими диодами.

Рекуперация энергии при торможении в АИТ возможна при сохранении направления тока за счет сдвига токов и напряжений, т.е. переводом АИТ в режим выпрямления за счет сдвига управляющих импульсов относительно фазных ЭДС электрической машины. Энергия, передаваемая от электрической машины на сторону постоянного тока, должна быть далее передана в сеть переменного тока. Для этого управляемый выпрямитель на входе ПЧ должен быть переведен в инверторный режим. При этом сохраняется направление тока и не требуется установка дополнительного комплекта вентилях. Схема применяется в двигателях достаточно большой мощности. Недостатками схемы являются ее не очень хорошие характеристики, поэтому она не является перспективной.

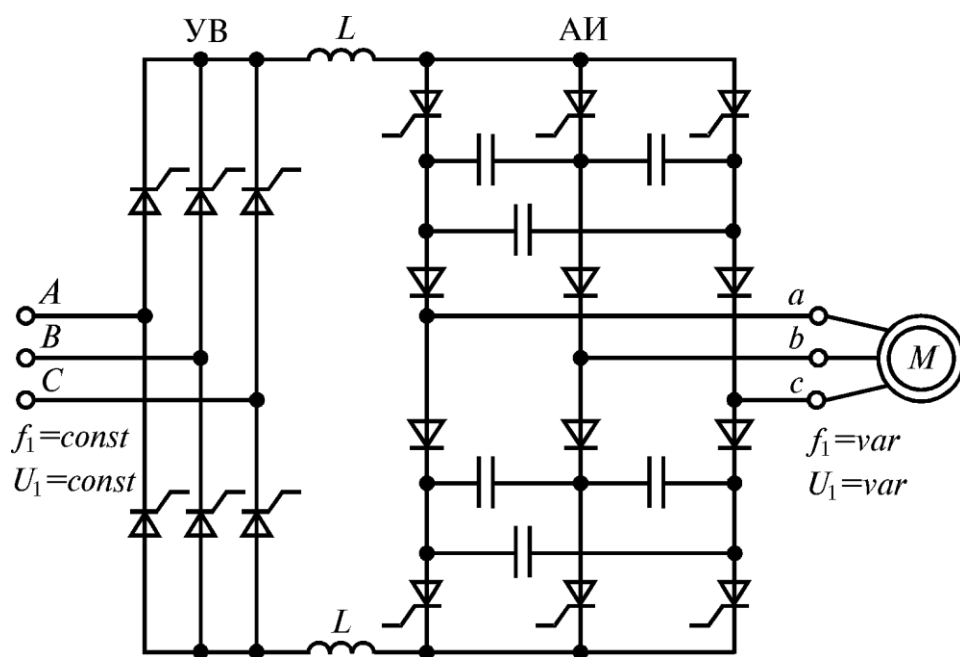


Рис. 9.7. ДПЧ на основе АИТ с отсекающими диодами

Появление запираемых тиристоров позволило улучшить характеристики ДПЧ на основе АИТ. На рис. 9.8 приведена схема ДПЧ на основе АИТ, выполненного на запираемых тиристорах.

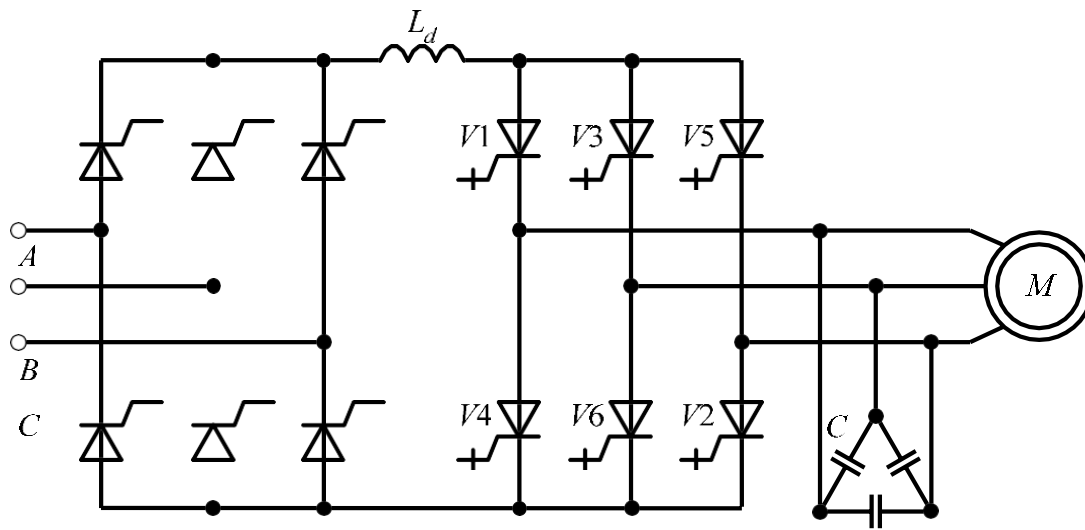


Рис. 9.8. ДПЧ на основе АИТ, выполненного на запираемых тиристорах

Формирование выходного тока осуществляется совместно управляемым выпрямителем и автономным инвертором тока. На рис. 9.9 показана временная диаграмма, отражающая моменты включенного и выключенного состояний тиристора V_1 . На участке соответствующим зоне 2, ключ V_1 включен постоянно, и ток сглаживающего дросселя непрерывно поступает в фазу А двигателя. Для формирования тока в зонах 1 и 3 необходимо соответствующим образом переключать тиристоры. Для обеспечения нарастания и спада тока (зоны 1 и 3 на рис. 9.9) обычно используется два метода – трапецеидальный и метод выборочного исключения гармоник. При использовании первого метода моменты коммутации ключей АИТ определяются по пересечению линейно нарастающего сигнала и опорного сигнала пилообразной формы следующего с несущей частотой, при втором методе моменты коммутации ключей рассчитываются заранее исходя из условия подавления высших гармоник определенного порядка (5 и 7 и т.д.).

В этой схеме улучшается синусоидальность тока, протекающего по фазам двигателя. Но сохраняются все недостатки, возникающие при питании от сети управляемых выпрямителей тока.

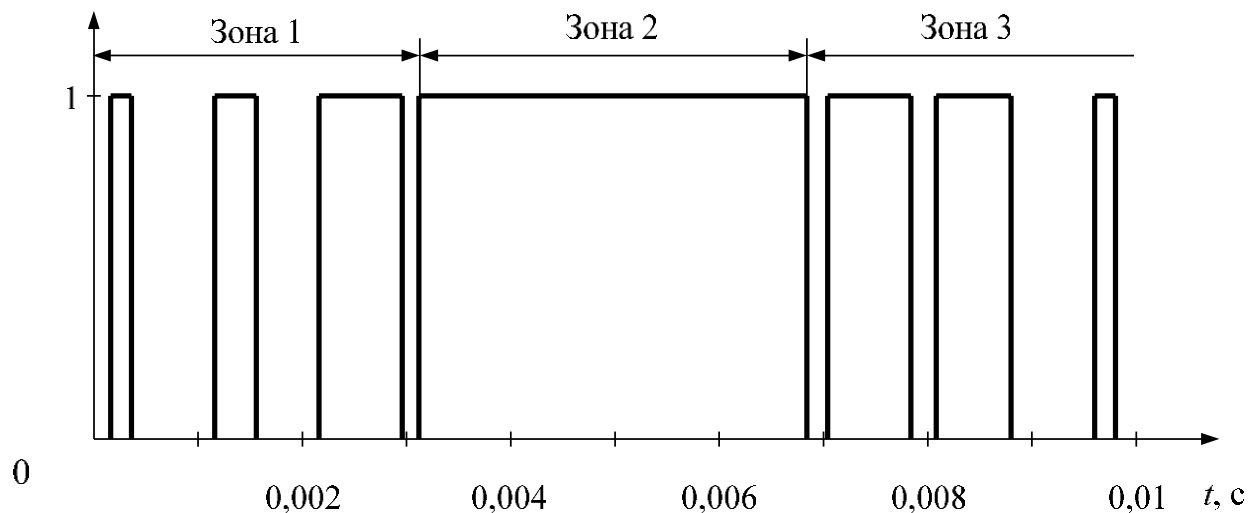


Рис. 9.9. Временная диаграмма сигналов управления ключом $V1$ (выходная частота АИТ – 50 Гц)

Преобразователи частоты на основе инверторов тока наиболее применимы в электроприводе синхронных машин, где на выходе вместо автономного инвертора тока включается инвертор тока, ведомый электрической машиной. Таким образом, на входе и на выходе ПЧ включаются однокомлектные рекуперирующие преобразователи (ОРП) на тиристорах. При этом, как видно из рис. 9.10, ведомый инвертор полностью аналогичен выпрямителю, подключенному к сети. Коммутация вентилей ведомого инвертора осуществляется за счет ЭДС электрической машины. При низкой скорости вращения электрической машины эта ЭДС недостаточна для коммутации вентилей. Поэтому при пуске коммутация осуществляется путем прерывания тока в цепи постоянного тока включением и запирианием выпрямителя.

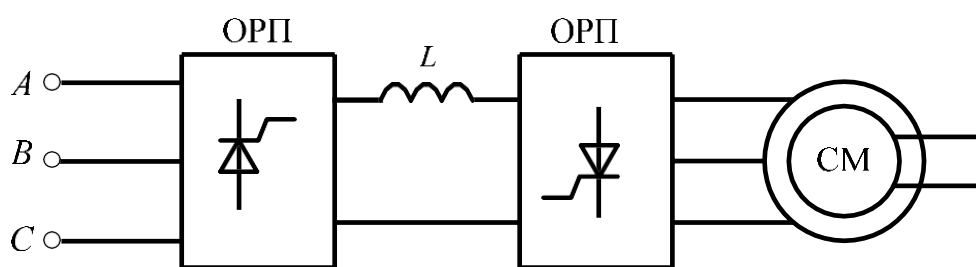


Рис.9.10. Двухзвенный преобразователь частоты на основе ведомых преобразователей

Контрольные вопросы

1. Из каких звеньев могут состоять ДПЧ, выполненные на основе АИН?
2. Как регулируется напряжение на выходе ДПЧ, выполненных на основе АИН?
3. По каким схемам могут выполняться рекуперирующие ДПЧ, выполненные на основе АИН?
4. Каковы преимущества четырехквadrантного ДПЧ?
5. Как работают ДПЧ на основе инверторов тока?

9.7. Матричные преобразователи

Матричный преобразователь – это универсальный преобразователь электрической энергии, позволяющий обеспечить любые преобразования между двумя системами. В частности на рис. 9.11 а приведена схема трехфазно-трехфазного матричного преобразователя частоты. Показанные на схеме ключи – это полностью управляемые симметричные (двунаправленные) ключи (см. рис. 9.11. б). В схеме предусматривается возможность присоединения любой фазы на выходе к любой фазе на входе. Также имеется возможность закорачивания всех фаз на выходе (нулевое напряжение). Чтобы сформировать выходное напряжение нужной величины нужно подключиться к фазе с ближайшим уровнем напряжения. Всегда существует два уровня нужного знака и один нулевой уровень. Таким образом, возможности не меньше, чем при обычной ШИМ. В отличие от НПЧ на тиристорах с неполной управляемостью здесь возможно получить частоты, как ниже, так и выше частоты сети. Преимущество схемы, как и всех НПЧ – однократное преобразование энергии. Главные трудности – необходимость прерывания тока в индуктивных цепях. Чтобы сохранить режим непрерывного тока на входе на рис. 10.11 а показано применение входных *LC*-фильтров. Возможны и другие решения. Пока матричные преобразователи не получили промышленного применения.

Контрольные вопросы

1. По каким схемам строятся НПЧ?
2. По каким законам управляются НПЧ?
3. Какие упрощающие допущения принимаются при расчете НПЧ?
4. Каковы преимущества и недостатки НПЧ?
5. Как работают матричные преобразователи?

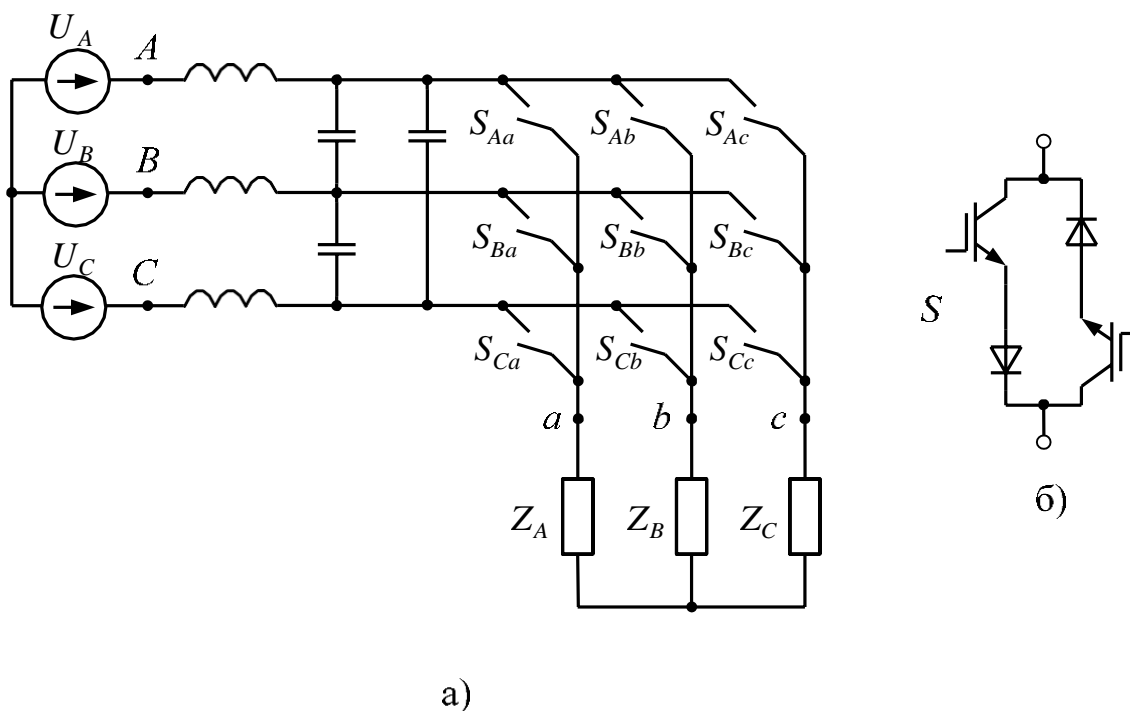


Рис. 9.11. Схема трехфазно-трехфазного матричного преобразователя частоты (а) и схема симметричного двунаправленного ключа (б)

Глава 10. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Преобразователи переменного напряжения (регуляторы переменного напряжения) предназначены для **изменения величины переменного напряжения**.

На рис. 10.1 а приведена схема однофазного преобразователя переменного напряжения, а на рис. 10.2 а диаграмма напряжения на нагрузке. Изменение действующего значения напряжения на нагрузке осуществляется изменением угла управления α . Такое регулирование называется **фазовым или импульсной модуляцией на основной частоте (ИМ–ОЧ)**. При таком регулировании даже печь сопротивления, имеющая практически чисто активное сопротивление, представляет для сети как бы индуктивную нагрузку. Тем не менее, такая схема применяется для регулирования активных и активно-индуктивных нагрузок – печей сопротивления, ламп накаливания, а также однофазных двигателей переменного тока, например, в электроинструменте. В схеме рис. 10.1 б применены запираемые тиристоры, что позволяет получить на нагрузке напряжение в соответствии с рис. 10.2 б или рис. 10.2 в. При таком регулировании печь сопротивления представляет для сети как бы емкостную нагрузку. В связи со сложностью быстрого прерывания тока в цепи, в которой имеется хотя бы небольшая индуктивность, схема усложняется за счет применения дополнительных элементов и поэтому не получила распространения.

В описанных способах изменение действующего значения напряжения на нагрузке осуществляется за счет изменения формы напряжения, что нежелательно для ряда потребителей. **Импульсная модуляция на высокой частоте (ИМ–ВЧ)** (см. рис. 11.2 г) позволяет при небольшом фильтре получать синусоидальную гладкую составляющую тока, потребляемого из сети, и напряжения на нагрузке при $\cos \varphi = 1$. Однако, в связи со сложностью прерывания тока в индуктивной цепи схема усложняется и поэтому также не получила распространения. **Импульсная модуляция на низкой частоте (ИМ–НЧ)** иллюстрируется рис. 10.2 д. Эта модуляция реализуется в схеме рис. 10.1 а. Уменьшение мощности, выделяемой в активной нагрузке, производится включением и выключением тиристоров в моменты перехода тока и напряжения через нуль. При питании активной нагрузки и ИМ–НЧ сохраняется импульсная модуляция, а определяется глубиной регулирования. **Импульсная модуляция на низкой частоте применима для инерционных объектов** (например, печей сопротивления).

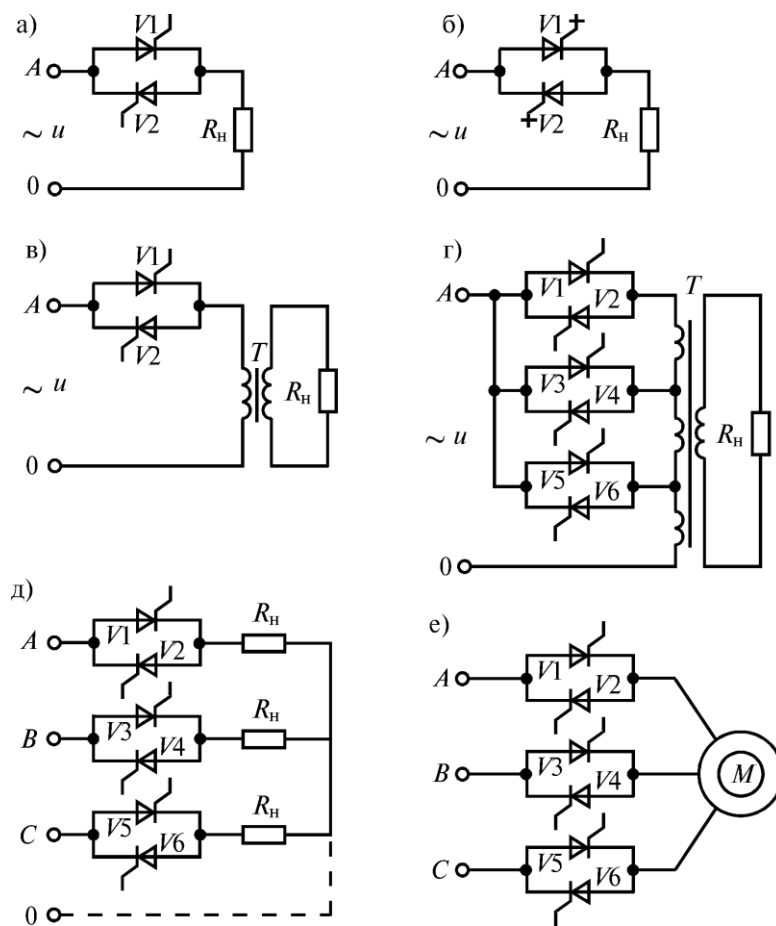


Рис.10.1. Преобразователь переменного напряжения: однофазные на неполностью (а) и полностью управляемых (б) тиристорах; однофазные на первичной стороне трансформатора (в) и трансформатора с отпайкой (г); трехфазные для регулирования напряжения на активной нагрузке (д) и двигателе (е).

Диапазон номинальных значений напряжений и токов электрических на-грузок чрезвычайно широк. Для согласования с напряжением сети применяются трансформаторы. При малых или очень больших напряжениях нагрузки для регулирования целесообразно включать тиристорные ключи на первичной стороне трансформатора, однако при этом возникает ряд проблем, связанных с насыщением трансформатора. Эти проблемы обостряются при ИМ–НЧ, когда включения трансформатора происходят очень часто.

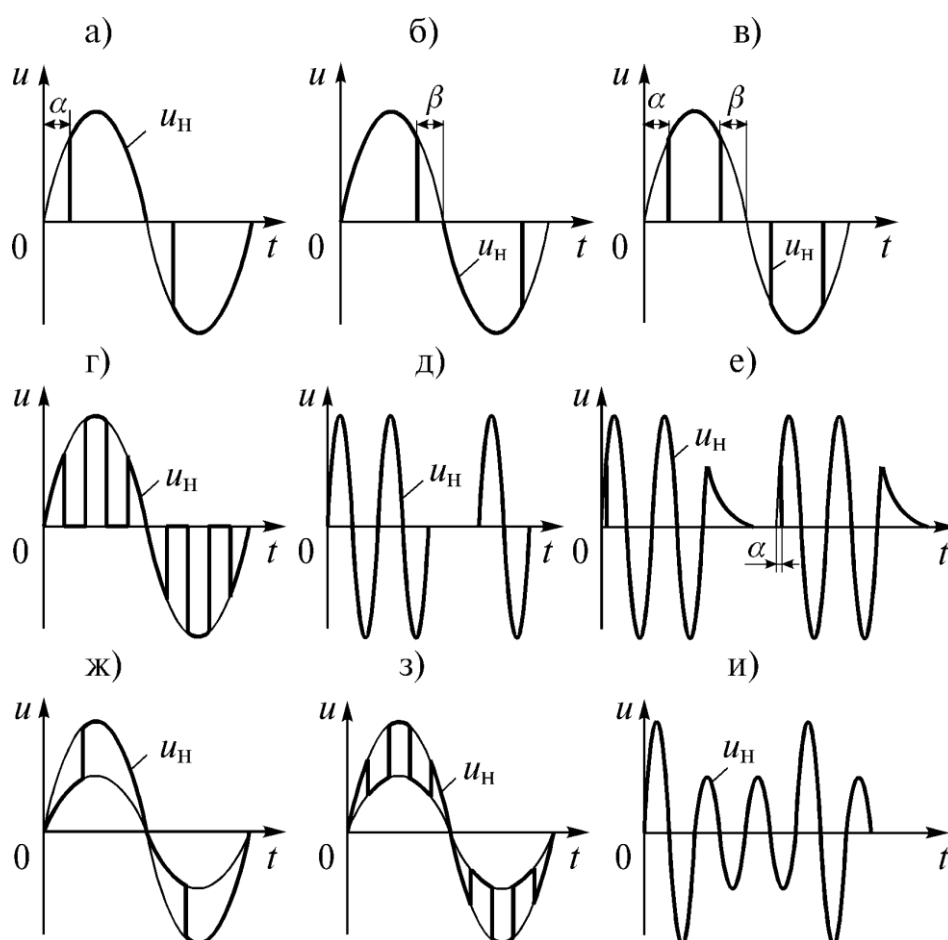


Рис. 10.2. Диаграммы напряжений на нагрузке ППН при различных способах управления (модуляции): ИМ–ОЧ (фазовое регулирование) с отстающим ($\alpha > 0$), опережающим ($\beta > 0$) и равным нулю ($\alpha = \beta$) углом сдвига φ (а, б, в); ИМ–ВЧ (г); ИМ–НЧ (д); ИМ–НЧ на первичной стороне трансформатора (е); многозонные ИМ–ОЧ (ж), ИМ–ВЧ (з) и ИМ–НЧ (и)

При включении трансформатора начальная магнитная индукция имеет определенные значения. В переходном процессе изменения индукции после включения с произвольным углом управления может быть превышено максимальное значение индукции установившегося цикла намагничивания. Это вызывает насыщение трансформатора и резкое увеличение (выброс) тока намагничивания, который снижается до установившегося значения за десятки периодов. Выбросы тока намагничивания могут в десятки раз превышать номинальный ток трансформатора. Введением определенного угла управления в первом полупериоде в начале каждого цикла включения можно практически устранить выбросы тока намагничивания. При этом диаграмма напряжения на нагрузке соответствует рис. 10.2 е.

Качество напряжения на выходе тиристорного регулятора переменного напряжения и коэффициент мощности могут быть улучшены при применении **многозонной импульсной модуляции**. Такая модуляция может быть реализована в схеме рис. 10.1 г. Диаграмма рис. 10.2 з может быть реализована, если в схеме рис. 10.1 г заменить обычные тиристоры на запираемые.

На рис. 10.1 д приведена схема трехфазного преобразователя переменного напряжения. Если нагрузка при этом имеет нулевой вывод, то процессы и диаграммы напряжений на нагрузке ничем не отличаются от процессов в однофазной схеме. При отсутствии нулевого вывода процессы и диаграммы существенно усложняются.

Фазовое регулирование может быть применено для регулирования скорости асинхронного двигателя (см. рис. 10.1 д). Однако, из-за большого содержания высших гармоник в токе, протекающем через фазы двигателя при таком регулировании, понижение скорости может быть весьма кратковременным во избежание перегрева двигателя. Такое регулирование получило очень широкое применение в устройствах для **ограничения пусковых токов асинхронных двигателей**. В устройствах для плавного пуска асинхронных двигателей угол управления плавно уменьшается от начального значения до полного включения тиристоров. При этом пусковые токи снижаются в 2...3 раза.

При импульсной модуляции на низкой частоте вредное влияние на сеть может быть ослаблено при синхронизации группы тиристорных регуляторов переменного напряжения. На рис. 10.3 а показаны диаграммы токов при синхронизации трех преобразователей переменного напряжения и приведен суммарный ток, потребляемый из сети. Колебания амплитуды суммарного тока, потребляемого из сети, не превышают амплитуду тока одного регулятора. При независимой работе регуляторов скачки тока могли бы достигать суммы токов трёх регуляторов. На рис. 10.3 б показана зависимость результирующего коэффициента мощности от глубины регулирования при независимой работе регуляторов, а на рис. 10.3 в при синхронизированном управлении. Из сравнения рисунков видно, что достигается существенный эффект.

Глава 11. ФИЛЬТРЫ

Назначение и классификация

Фильтры служат для устранения гармонических составляющих и выделения основной составляющей тока (напряжения). Фильтры включаются на входе и на выходе преобразователей. Фильтры, выполненные только на реактивных элементах (индуктивностях и емкостях), называют **пассивными**. Часто в состав этих фильтров входят и резисторы, демпфирующие колебания, возникающие в высокодобротных контурах. В данной главе рассматриваются только такие фильтры.

Входные фильтры служат для уменьшения вредного влияния преобразователей на питающую сеть. Кроме того, они защищают преобразователь от электромагнитных помех, передающихся из сети. Их часто называют сетевыми фильтрами.

Выходные фильтры улучшают форму выходного напряжения преобразователя. Выходные фильтры, улучшающие выходное напряжение преобразователей с выходом на постоянном токе называются **сглаживающими**.

Выходные фильтры, улучшающие выходное напряжение преобразователей с выходом на переменном токе называются выходными фильтрами переменного тока или просто выходными.

11.1. Сглаживающие фильтры

Выходные фильтры, применяемые для улучшения качества постоянного напряжения, называются сглаживающими. Сглаживающие фильтры бывают емкостные, индуктивные, Г-образные и др.

Емкостной фильтр

Схема включения емкостного фильтра показано на рис. 11.1 а.

На рис. 11.2. показан переходный процесс нарастания напряжения на выходе выпрямителя при наличии емкостного фильтра. В момент включения конденсатор создает короткое замыкание и первый импульс тока весьма велик. Вентили отпираются в моменты, когда ЭДС на вторичных обмотках превышает напряжение на конденсаторе, и запираются в моменты, когда ЭДС на вторичных обмотках снижаются ниже напряжения на конденсаторе. Выпрямитель работает в режиме прерывистого тока. Во время переходного процесса ток постепенно уменьшается, вместе с ним уменьшается угол проводимости вентилей λ .

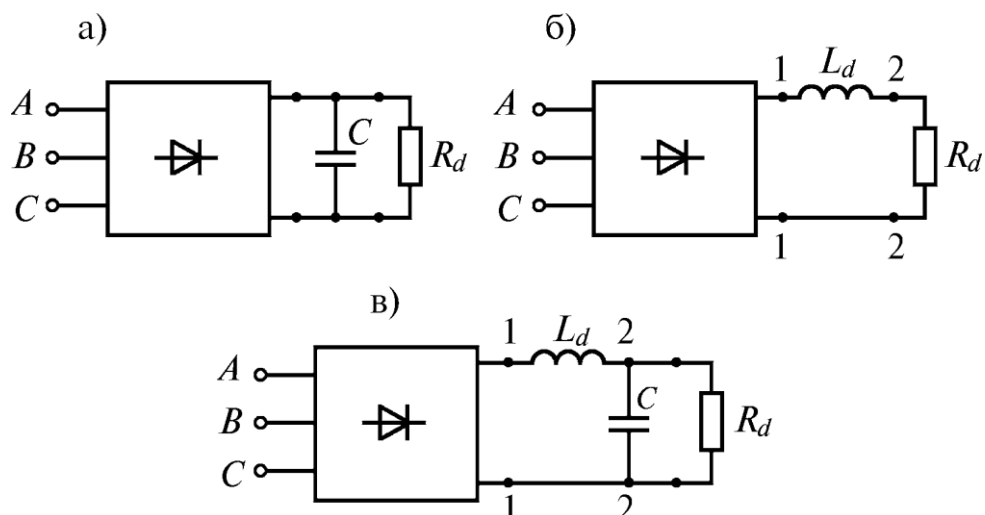


Рис. 11.1. Схемы присоединения сглаживающих фильтров к выпрямителям: емкостного (а), индуктивного (б), Г-образного (в)

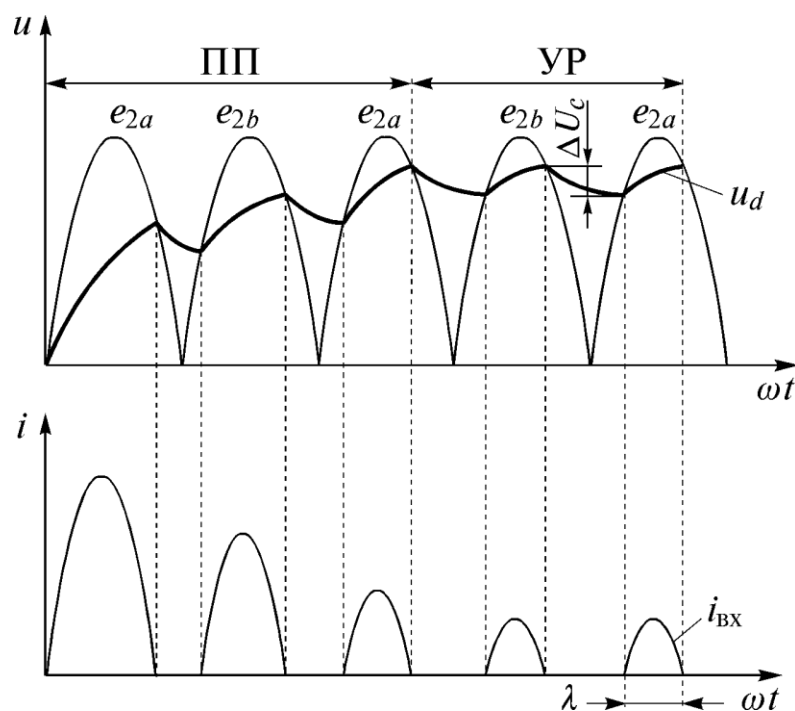


Рис.11.2. Временные диаграммы токов и напряжений в однофазной мостовой схеме, работающей на емкостный фильтр (ПП-переходной процесс; УР-установившейся режим).

Недостатки фильтра – начальный бросок тока при включении, тяжелые условия работы вентилях выпрямителя и вредное влияние на питающую сеть из-за малого угла проводимости вентилях.

Преимущество фильтра – его простота.

Для уменьшения начального броска тока применяется предварительный заряд конденсатора через зарядный резистор.

Основное применение емкостных фильтров – выпрямители небольшой мощности.

При применении устройств предварительного заряда и включении на входе выпрямителя токоограничивающих реакторов они могут применяться при достаточно больших мощностях, например, на выходе первого звена двухзвенного преобразователя частоты.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение фильтров в преобразовательной технике?
2. Принципы действия сетевых фильтров.
3. Принцип действия, преимущества, недостатки и область применения сглаживающих емкостных фильтров.

Глава 12. УСТРОЙСТВА, УЛУЧШАЮЩИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

12.1. Энергетические показатели и качество электрической энергии

Проблема снижения потерь и повышения качества электрической энергии в электрических сетях является одной из важнейших в энергосбережении. Передача максимальной активной мощности является показателем эффективности использования электрической сети. В идеале наилучшими потребителями были бы нагрузки, потребляющие чисто синусоидальный ток при $\cos \varphi$ близком к единице.

Высшие гармоники оказывают отрицательное влияние на работу промышленных электросетей, системы автоматики, телемеханики и связи, уменьшают надежность и срок службы электрооборудования. Поэтому внедрение вентильного электропривода и электротехнологии, сопровождающееся появлением значительных искажений напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, обусловило возникновение новой научно-технической проблемы – **проблемы высших гармоник и электромагнитной совместимости нагрузок с питающей сетью.**

12.2. Классификация устройств повышающих энергетические показатели и качество электрической энергии

Можно предложить следующую классификацию устройств обеспечивающих повышение энергетических показателей и качества напряжения в сети (рис.12. 1).

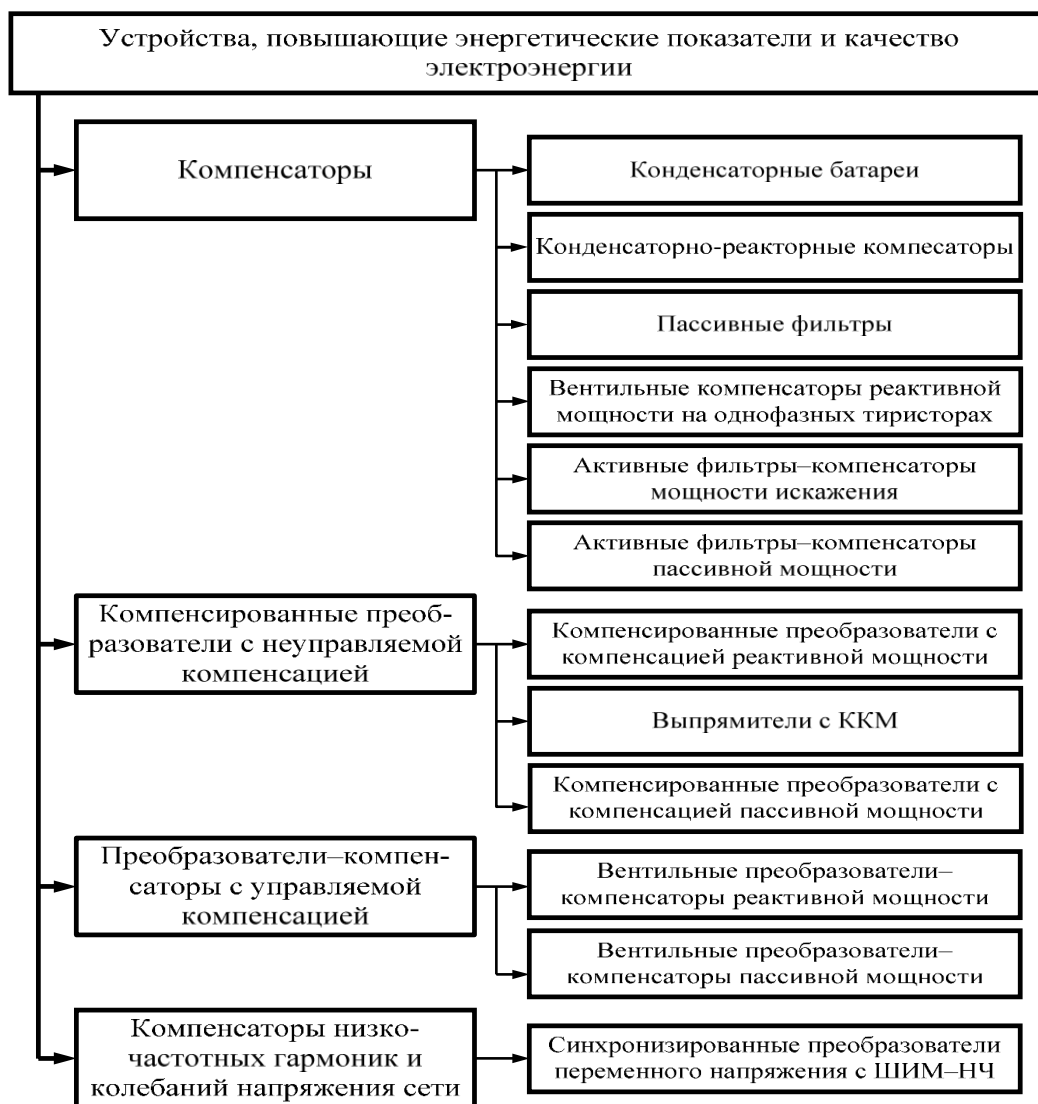


Рис. 12.1. Классификация устройств, повышающих энергетические показатели и качество электроэнергии.

При принятой классификации все устройства повышающие коэффициент мощности и качество напряжения в сети разбиты на три типа:

1) устройства, предназначенные только для компенсации реактивной мощности или мощности искажений (уменьшения несинусоидальности кривой напряжения сети). Назовем такие устройства компенсаторами (компенсаторами реактивной мощности или мощности искажений). Они могут **управляться** в функции дефицита реактивной мощности в сети;

2) устройства, обеспечивающие электроснабжение каких-либо потребителей, удовлетворяя требования технологии и одновременно повышающие собственные энергетические показатели. Назовем такие устройства компенсированными преобразователями с неуправляемой компенсацией. Они могут выдавать реактивную мощность в сеть, но **не управляются** в функции дефицита реактивной мощности в сети;

3) устройства, обеспечивающие электроснабжение каких-либо потребителей и одновременно повышающие энергетические показатели всей системы электроснабжения (СЭС) и качество напряжения в ней. Назовем такие устройства вентильными преобразователями-компенсаторами (ВПК) пассивной мощности. Они **управляются** так, чтобы суммарный ток, потребляемый из сети, приближался к оптимальному, т.е. чтобы ток был синусоидальным и имел заданный угол сдвига φ относительно напряжения (напри- мер, $\varphi = 0$). Для краткости назовем такое управление компенсацией дефицита пассивной мощности.

В зависимости от управления некоторые устройства могут переходить из одного типа в другой.

Таким образом, при этой классификации устройства делятся на собственно компенсирующие (только улучшающие показатели сети, но не выполняющие полезной технологической функции), устройства, повышающие свои энергетические показатели и частично улучшающие показатели сети, и устройства, которые не только улучшают свои энергетические показатели, но и компенсируют недостатки других. Все устройства компенсации могут быть с неуправляемой компенсацией и с компенсацией управляемой в функции общего энергопотребления из сети. Очевидно, что наиболее целесообразно применение устройств, которые выполняют требования технологии и одновременно обеспечивают повышение качества электрической энергии.

Глава 13. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

13.1. Контроллеры управления

Классификация контроллеров управления

В настоящее время для управления вентильными преобразователя, например, преобразователей постоянного напряжения (ППН), источников вторичного электропитания (ИВЭП), корректоров коэффициента мощности (ККМ) и т.д. выпускается огромное множество специализированных микросхем, называемых **контроллерами управления**. В большинстве случаев, контроллеры управления нашли очень широкое применение в импульсных источниках электропитания. Поэтому главная цель такой схемы управления – это не только формирование управляющих импульсов для силовых ключей источника, но и поддержание постоянного выходного напряжения для большого диапазона токов нагрузки. Для этой цели в контроллерах обязательно используется контур отрицательной обратной связи по напряжению. Для

того чтобы источник питания не превышал своих номиналов мощности в нем также осуществляется непосредственный контроль за током нагрузки или силового ключа.

Рассмотрим классификацию контроллеров управления (рис. 13.1). По **виду модуляции** в контроллерах управления выделяют: широтно- импульсную, частотно- широтно-импульсную, частотно-импульсную и фазо-импульсную модуляции.



Рис. 13.1. Классификация контроллеров управления

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) характеризуется тем, что период T_0 следования импульсов на выходе контроллера является величиной постоянной, а от величины сигнала управления зависят только интервалы времени t_1 и t_2 (рис. 13.2). В этом случае спектр пульсаций выходного напряжения имеет известные частоты спектральных составляющих. Это значительно облегчает задачу подавления пульсаций и выбора частоты преобразования энергии из условия наименьшего влияния на другие устройства-рецепторы. ШИМ получила наибольшее применение в контроллерах управления.

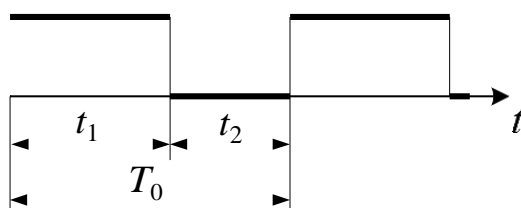


Рис.13.2. Напряжение на выходе контроллера

Частотно-широотно-импульсная модуляция (ЧШИМ) характеризуется тем, что здесь от величины сигнала управления зависят сразу три временных координаты контроллера: t_1 , t_2 и T_0 . Данный вид модуляции используется в контроллерах с релейно-токовым управлением, когда происходит формирование требуемого тока в заданном коридоре. Основным недостатком ЧШИМ-контроллеров является их зависимость частоты коммутации (периода T_0) от входного напряжения и тока нагрузки. Это обстоятельство обуславливает более сложные требования к фильтрам выходного напряжения. С другой стороны, как будет показано ниже, такие контроллеры оказываются проще и позволяют добиться более высоких частот коммутации и высоких динамических характеристик.

В **частотно-импульсной модуляции (ЧИМ)** изменяется период T_0 следования импульсов при постоянной их длительности t_1 или паузе t_2 . Данный вид модуляции наибольшее применение получил в системах управления резонансными инверторами и стабилизаторах напряжения на их основе. Особенностью резонансных преобразователей является использование колебательных процессов, возникающих в LC -контуре, встроенном в преобразователь. Резонансные преобразователи с ЧИМ обладают заметными преимуществами при их использовании на частотах, близких граничным частотам используемых ключей и трансформаторов. Эти преимущества заключаются в снижении массогабаритных показателей за счет использования высоких частот преобразования (300 кГц – 2 МГц) и снижения потерь на переключение, которое производится при нулевом токе или напряжении. По этой же причине резонансные преобразователи обладают меньшими электромагнитными помехами. Резонансные преобразователи применяются, как правило, для построения относительно мощных преобразователей общих для питания последующих стабилизаторов меньшей мощности.

Фазо-импульсная модуляция, также как и ШИМ, позволяет регулировать напряжение на выходе преобразователя, но не за счет изменения длительности импульса t_1 при сохранении периода T_0 , а за счет регулирования фазового сдвига одного управляющего импульса относительно другого. Такой способ широко применяется в однотактных и двухтактных преобразователях мостового типа.

13.2. Усилители мощности импульсов управления

Классификация и требования к усилителям мощности импульсов управления

Поскольку мощности выходных сигналов цифровых схем управления недостаточно для надежной работы силовых ключей, то поэтому в системах управления вентиляционными преобразователями обязательно применяют усилители мощности (УМ) импульсов управления.

Основные требования, предъявляемые к УМ, заключаются в следующем.

1. Формирование усиленных импульсов управления, согласованных с управляющей частью силового ключа.

2. Создание минимальных потерь мощности во включенном и выключенном состоянии силового ключа, а также в динамических режимах переключения.

3. Потенциальная развязка между силовой и информационной частями преобразователя, т.к. в большинстве случаев силовой блок ВП работает с высоким напряжением, проникновение которого в цепи управления СУ недопустимо с точки зрения работоспособности элементов информационной электроники и безопасности обслуживающего персонала.

4. Защита силового ключа путем контроля за его определенными параметрами (например, током или напряжением в открытом состоянии ключа).

В зависимости от применяемого силового ключа вентильного преобразователя УМ бывают: **тиристорные** и **транзисторные** (рис. 13.3.).

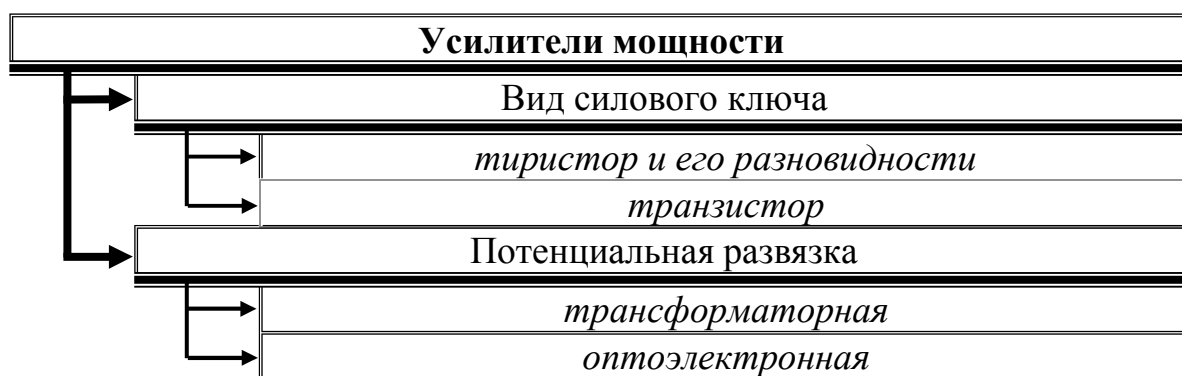


Рис. 13.3. Классификация усилителей мощности импульсов управления.

Усилители мощности импульсов управления транзисторами

Схемотехника УМ импульсов управления транзисторами в первую очередь зависит от типа транзистора (биполярный, полевой, *IGBT*) и его статических и динамических свойств. **Управление биполярными транзисторами.** Основными требованиями, предъявляемыми к ключу на биполярном транзисторе, являются насыщение транзистора током базы, обеспечивающее беспрепятственное протекание тока коллектора на интервале, когда транзистор должен быть включен, и минимизация тока утечки на интервале, когда транзистор должен быть выключен. Идеальная форма тока базы i_b и напряжения база-эмиттер $u_{бэ}$ для биполярного транзистора представлены на рис. 13.4. а. При реализации такого импульса необходимо учитывать следующее:

- повышенная амплитуда тока базы при включении обеспечивает снижение времени задержки на включение;
- биполярный транзистор включается током, поэтому его ток базы должен создаваться источником тока, а не источником напряжения;
- после включения ток базы снижается, в результате чего накопленный в базе заряд уменьшается. Это приводит к снижению времени на следующее

выключение;

– импульс обратного тока базы при выключении приводит к более быстрому снижению тока коллектора i_k , т.е. более быстрому выключению;

– после выключения обратное напряжение база-эмиттер $u_{бэ}$ обеспечивает повышение допустимого напряжения коллектор-эмиттер $u_{кэ}$ и снижает ток утечки транзистора.

На практике необязательно осуществлять такое сложное управление, требующее дополнительных устройств в цепях УМ. Требования к сигналу управления определяются требованиями к быстродействию ключа (рабочей частоте коммутаций) и к величине потерь в нем. Простейшая схема УМ биполярного транзистора без гальванической развязки представлена на рис.13.4.б. Для уменьшения потребляемой мощности УМ применяют парные (комплементарные) транзисторы $VT2$, $VT3$, работающие попеременно. Когда импульс управления отсутствует ($u_y = 0$), транзистор $VT4$ включен и через его коллектор протекает отпирающий ток базы $VT2$. Силовой транзистор $VT1$ включается током эмиттера транзистора $VT2$. Транзистор $VT3$ при этом выключен, так как его эмиттер имеет отрицательный потенциал относительно базы. Конденсатор $C1$ заряжается током базы силового транзистора $VT1$ (полярность без скобок указана на рис. 15.5. б), обеспечивая бросок тока при включении транзистора. В момент поступления импульса от системы управления $u_y > 0$ транзисторы $VT4$ и $VT2$ выключаются, а транзистор $VT3$ включается напряжением конденсатора $C1$, который, разряжаясь, обеспечивает базовый ток силового транзистора при выключении.

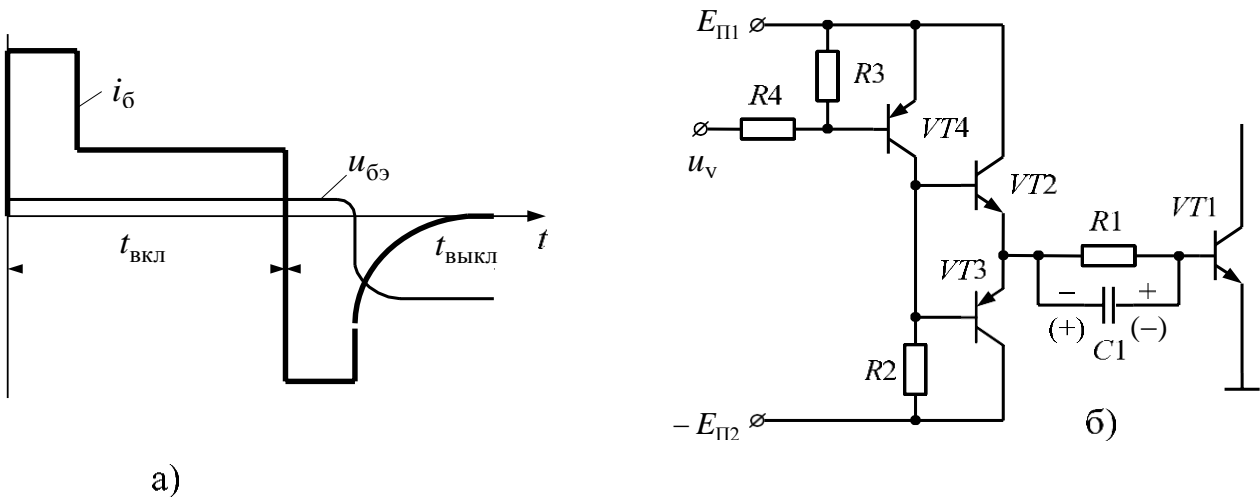


Рис.13.4. Идеальный импульс управления биполярным транзистором (а) и схема транзисторного усилителя мощности (б)

ГЛАВА 14. Термоэлектрические генераторы электрической энергии и возможности их использования при разделении источников тепла и холода.

14.1. Конструкции термоэлектрических преобразователей энергии.

Термоэлектрическое устройство состоит из трех основных узлов: собственно термоэлектрической батареи; системы теплоотвода от горячих спаев термобатареи; системы теплоподвода к холодным спаям термобатареи. Особенностью подобных устройств является непосредственный контакт горячих и холодных спаев термобатареи с системами теплоотвода и теплоподвода, что обуславливает тесную взаимозависимость термоэлектрических и теплотехнических характеристик и требует комплексного нахождения оптимальных конструктивных вариантов.

Основа любого термоэлектрического охлаждающего или нагревательного устройства - отдельные термоэлементы, соединяемые между собой по последовательной или параллельно-последовательной схеме. Отдельный (единичный) термоэлемент состоит из двух полупроводниковых ветвей, одна из которых обладает дырочной, а другая электронной проводимостью. Соединение ветвей в термоэлемент происходит посредством коммутационной пластины. Классификацию ветвей термоэлементов целесообразно проводить по форме их «токового» сечения. (Под «токовым» сечением подразумевается сечение, перпендикулярное направлению движения тока.) Практически формы ветвей и сечений могут быть любыми, но в настоящее время получили распространение ветви с прямоугольным, круглым, секторным и кольцевым сечениями площадью от 0,05 до 4 см². Наиболее широко применяются ветви с прямоугольным сечением, технология изготовления которых хорошо освоена и не вызывает особых затруднений.

Возможны различные варианты выполнения ветвей с прямоугольным сечением: плоского типа, в форме параллелепипеда и куба. Выбор того или другого варианта обусловлен необходимостью обеспечить требования, касающиеся компактности, весогабаритных показателей, экономичности, допустимых величин тока и т. д. Применение ветвей с прямоугольным сечением ограничивает возможности конструктивного выполнения термобатарей, так как в этом случае обычно требуются плоские системы теплоотводов и теплоподводов, но позволяет получить высокую компактность за счет минимально возможных зазоров между ветвями.

Применение ветвей с круглым сечением плоского типа или в форме цилиндра не позволяет получить высоких значений коэффициента заполнения, представляющего собой отношение площади всех полупроводниковых ветвей к общей площади термобатареи ($\eta_{\text{зап}} = S/S_{\text{ТЭБ}}$). Это вызывает дополнительный тепловой поток от горячих спаев к холодным через изоляцию в зазорах между ветвями и уменьшает величину полезной холодопроизводительности термобатареи.

В ряде конструкций термоэлектрических устройств нашли применение ветви термоэлементов с кольцевым или секторным сечением. Несмотря на трудности технологического и конструктивного порядка применение кольцевых термокомпонентов для судовых устройств следует признать наиболее перспективным,

так как они позволяют использовать в качестве теплообменных поверхностей трубчатые компоненты и получать компактные малогабаритные устройства.

Для демпфирующих прокладок применяют свинцовые пластины толщиной 0,3-0,7 мм. Технология подготовки ветвей к коммутации в этом случае несколько усложняется. Ветвь термоэлемента залуживают специальным и легкоплавким припоем. Тем же легкоплавким припоем покрывают одну из сторон свинцовой пластины, другую ее сторону покрывают припоем, обладающим меньшей температурой плавления. После этого пластину припаивают к ветви.

Под коммутацией обычно понимают соединение ветвей р- и n-типов с помощью коммутационной пластины в термокомпонент. Выбранная схема коммутации и сама коммутация должны обеспечивать:

- незначительное переходное электрическое сопротивление от одной ветви к другой;
- незначительное тепловое сопротивление от спая к теплообменной поверхности;
- достаточную механическую прочность соединения; снятие или уменьшение тепловых, ударных, вибрационных и других нагрузок на ветви термокомпонента; технологичность сборки.

В качестве материала для коммутационных компонентов в настоящее время применяют в основном медь, которая имеет высокую теплопроводность и низкое удельное электрическое сопротивление, а коммутацию производят методом непосредственной пайки коммутационных компонентов к ветвям р- и n-типов с использованием легкоплавких припоев.

Конструкция коммутационных компонентов весьма разнообразна. Наиболее проста обычная медная пластина, применяемая для коммутации ветвей с прямоугольным или круглым сечением. Предварительно коммутационная пластина залуживается тем же легкоплавким припоем, что и ветви термокомпонентов. Подобная конструкция термокомпонента является жесткой и не устраняет в достаточной степени возникающих при работе механических напряжений. Чаще обычные медные пластины применяют со свинцовыми демпфирующими прокладками, которые, вследствие своей эластичности, разгружают ветви от напряжений. При небольших перепадах температур иногда оказывается достаточным применение разрезных коммутационных пластин, тонкая перемычка которых обладает упругостью и небольшим электрическим сопротивлением благодаря ее малой длине.

В ряде конструкций нашли применение компенсированные коммутационные пластины и пластины с различной длиной по холодной и горячей сторонам термокомпонента.

В термоэлектрических устройствах, предназначенных для охлаждения или нагрева воздуха, теплообменной поверхности часто придают функции коммутационного компонента.

Разобранные примеры не исчерпывают всех возможных конструктивных соединений ветвей в термокомпонент и типов коммутации. Наряду с широко

распространенным способом коммутации - залуживанием специальными припоями, существует ряд других методов - диффузионное сращивание, жидкая или полужидкая коммутация, использование затвердевающих сплавов галлия с медью, никелем и другими металлами, метод прижимной коммутации и т. д. В термоэлектрических охлаждающих или нагревательных устройствах указанные типы коммутации применяются крайне редко.

Для изоляции токоведущих компонентов термобатареи от теплообменных поверхностей применяют электроизолирующие прослойки (электроизолирующие теплопереходы). Название предопределено требованиями, которым должна удовлетворять прослойка - высокие изоляционные свойства и малое тепловое сопротивление. Первое требование обеспечивает надежность работы, а второе - низкие рабочие перепады температур и, следовательно, более высокое значение холодильного коэффициента.

Помимо того, электроизолирующий теплопереход должен быть механически прочным. Конструкция единичных (применяемых для изоляции одного термокомпонента) прослоек весьма разнообразна. Наиболее простым является теплопереход, состоящий из двух медных, оксидированных с одной стороны пластин, склеенных между собой эпоксидным компаундом. В данном случае медные пластины выполняют функции коммутационных компонентов. Слой оксидной пленки обычно не превышает 0,1-0,2 мкм, и его механическая прочность невелика. Кроме того, слой эпоксидной смолы порядка 10-15 мкм обладает достаточно высоким тепловым сопротивлением. При величине теплового потока в 1 Вт/см² перепад температур превышает 3,5°.

Улучшить механические и изоляционные свойства клеенных эпоксидным компаундом теплопереходов можно за счет применения кабельной бумаги толщиной 5-10 мкм вместо оксидной пленки. Для уменьшения теплового сопротивления надо поверхности медных пластин притирать, что значительно усложняет технологию их изготовления, но зато перепад температур не превышает 2,5°. В ряде устройств нашел применение теплопереход аналогичной конструкции, в котором одна из медных пластин заменена свинцовой.

Наиболее полно удовлетворяют всем требованиям керамические теплопереходы, обладающие высокими электроизоляционными свойствами, хорошей теплопроводностью и механической прочностью. В качестве керамики применяют чаще всего алунд Al₂O₃, реже окись бериллия BeO, хотя теплопроводность последней значительно выше. Это объясняется чрезвычайно большой токсичностью окиси бериллия при ее обработке. Присоединение медных пластин производят либо путем пайки к предварительно металлизированной керамике, либо путем диффузионной сварки.

В термоэлектрических устройствах используются два типа систем теплоподвода и теплоотвода - радиаторная (с принудительной или естественной циркуляцией воздуха) и жидкостная. Теплообменные поверхности должны обеспечивать минимально возможный перепад температур между теплоносителем и спаями термокомпонентов за

счет интенсивного теплообмена, развитой поверхности и небольшого теплового сопротивления.

Одновременно поверхности должны быть компактными и не нагружать значительно. Оребрение системы может выполняться как отдельно для каждого термокомпонента, так и для термобатареи в целом. В последнем случае требуется установка теплопереходов. Широкое распространение в термоэлектрических устройствах, предназначенных для тепло-влажностной обработки воздуха, получили пластинчато-ребристые поверхности с гладкими, волнистыми, перфорированными и стерженьковыми ребрами.

Данный тип оребрения позволяет сосредоточить в единице объема большую поверхность теплообмена и иметь практически любую необходимую геометрию ребер - толщину, высоту, длину, шаг и т. д.

Наиболее просты в конструктивном и технологическом отношении поверхности с гладкими ребрами, у которых сечение каналов для прохода воздуха может быть прямоугольным, треугольным или со скругленными углами. Ребра могут изготавливаться отдельно или из одной ленты и припаиваться к основанию. Часто для уменьшения теплового сопротивления оребрения в основании фрезеруют специальные канавки, куда устанавливаются, а потом припаивают ребра. С целью интенсификации теплообмена ребра изготавливают волнообразными или перфорируют. Весьма высоким значением коэффициента теплоотдачи характеризуются пластинчато-стерженьковые поверхности, у которых ребра могут иметь шахматное или коридорное расположение. К числу недостатков последнего типа оребрения следует отнести значительные величины коэффициентов аэродинамического сопротивления.

Пластинчато-ребристые поверхности применяются в основном в термобатареях плоского типа с термокомпонентами прямоугольного или круглого сечения. Теплообменная поверхность по горячей стороне в этом случае обычно выполняется в виде плиты со сверлеными или фрезерованными каналами для прохода воды. Выбор того или другого типа поверхности и геометрии ребер должен производиться в каждом конкретном случае с учетом многих факторов. К ним, прежде всего, следует отнести допустимые величины потерь напора, требования к весовым и габаритным показателям, технологичность изготовления и др. Стремление иметь развитую поверхность за счет увеличения высоты ребер и малого шага может привести к недопустимым нагрузкам на термокомпонент при вибрациях и ударных сотрясениях. С другой стороны, применение поверхностей с невысоким значением степени оребрения резко сказывается на энергетических затратах вследствие увеличения рабочих перепадов температур.

Пластинчато-ребристые поверхности другой конфигурации также находят применение в конструкциях термобатарей неплоского типа. Например, в термоэлектрических устройствах с теплоотводящей системой, выполненной в виде трубы.

В подобных схемах для придания всей конструкции определенной жесткости и разгрузки термокомпонентов от напряжений стали применять ребра с охватом всех

термокомпонентов по периметру. Такая конструкция оребрения, хотя и требует наличия теплопереходов по холодной стороне, зарекомендовала себя положительно в ряде устройств с довольно жесткими условиями эксплуатации. В кольцевых термокомпонентах применяют обычные трубчатые (оребранные и неоребранные) компоненты.

Краткое рассмотрение термоэлектрических устройств безусловно не исчерпывает всех возможных вариантов их конструктивного выполнения и использования.

В настоящее время выделяют следующие области применения ТЭГ:

- для питания маломощных потребителей энергии (до киловатта);
- для катодной защиты нефте- и газопроводов от коррозии;
- для питания космических аппаратов электрической энергией;
- для питания электрической энергией навигационных и метеорологических установок.

Рассмотрим возможные конструктивные варианты таких ТЭГ.

ТЭГ по принципу действия представляют собой тепловые машины, в которых рабочим телом является электронный газ полупроводникового элемента, преобразующий тепловую энергию в электрическую. Как в любой тепловой машине, КПД ТЭГ зависит от КПД цикла Карно - $(T_g - T_x)/T_g$, что определяет требования к конструкции в виде минимальных тепловых потерь при теплопередаче к рабочему телу, т. е. к полупроводниковому материалу, и при съеме тепла с него. Среди основных узлов ТЭГ следует выделить: источник теплоты, термобатарею с коммутационными и изоляционными элементами, техническое средство для теплосъема и несущая конструкция, обеспечивающая прочность всего термоэлектрогенератора, а также надежность его работы.

ТЭГ можно классифицировать по источникам теплоты, назначению, рабочим температурам, геометрии и конструкции термобатарей. Эти классификации имеют и положительные, и отрицательные стороны, но ни одна из них не дает достаточно четкого деления термоэлектрогенераторов по типам, так как большинство принципов конструирования сохраняется у ТЭГ самых разных мощностей, назначений и конструкций.

Эти принципы можно свести к следующим главным. ТЭБ должна быть компактной, аккумулировать как можно большую часть подводимого к ней тепла, обладать высокой механической прочностью и химической стойкостью при больших градиентах температуры в течение продолжительного времени (до года и более). Конструкция должна выдерживать вибрацию, удары и перегрузку. Так как подавляющее большинство ТЭГ даже при небольших мощностях вырабатывает электрический ток в десятки и даже сотни ампер, в их конструкциях требуется предусмотреть условия передачи электрической энергии к нагрузке без значительных потерь. Несмотря на все многообразие существующих конструкций ТЭГ и значительное число требований к ним, можно условно разделить все известные тер-

моэлектродгенераторы по основным конструктивным схемам на панельные, радиальные, шаровые и короткозамкнутые.

14.2. Разновидности термоэлектрических генераторов.

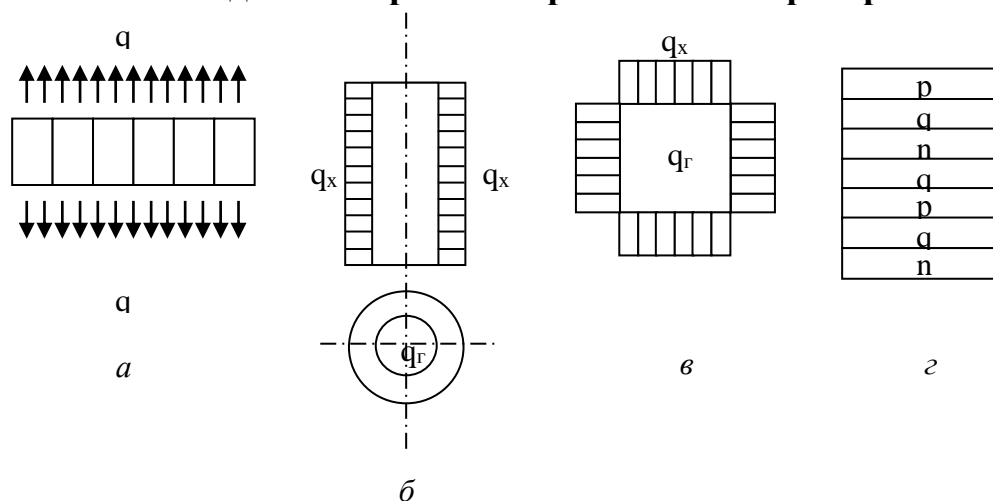


Рисунок 14.1. - Схемы ТЭГ

a – панельный, *б* – радиальный, *в* – шаровой, *г* – короткозамкнутый.

В состав панельных ТЭГ (рисунок 14.1, а) входит плоская ТЭБ, собранная из параллельно или последовательно соединенных полупроводниковых термоэлектрических элементов. В данной схеме могут использоваться различные источники теплоты. В случае применения солнечной энергии для нагрева горячих спаев термоэлектрической батареи в составе конструкции электроизоляция не требуется. Наиболее часто термобатарею нагревают тем или иным теплоносителем, например жидким металлом или насыщенным паром. При такой конструктивной реализации ТЭГ теплоноситель прокачивается в теплопроводах, что вызывает дополнительные конструктивные трудности, в частности формирование системы циркуляции, характеризующейся как можно меньшими электрическими затратами, выбор материала теплопровода с минимальным тепловым сопротивлением, реализация надежного теплового контакта теплопровода с электроизоляцией и последней с термобатареей. При этом значительную роль играет обеспечение механической прочности конструкции, что связано с согласованием коэффициентов линейного расширения слоев или конструктивных термических развязок. В качестве источников теплоты панельных ТЭГ также могут применяться радиоизотопы, однако при этом требуется тщательный выбор материала оболочек и обеспечение его контакта с изоляцией, а также создание конструкции, обеспечивающей минимальные тепловые потери от теплопровода в окружающую среду. Газовый нагрев панельных ТЭГ в

большинстве случаев не применяется, так как в этом случае незначителен коэффициент теплопередачи от источника теплоты к тепловоспринимающей поверхности.

Охлаждение панельных термобатарей реализуется либо хладагентом, либо оребренной поверхностью. Теплоноситель также находится в теплопроводе, и его эффективное применение требует решения тех же задач, что и для горячего теплоносителя. В качестве охлаждающего теплоносителя могут выступать вода или жидкий металл. Оребрение используется и в наземных условиях, когда невозможны траты энергии на транспортировку теплоносителя.

Достоинство панельных ТЭГ - идеальное использование поверхности подвода теплоты за счет ее заполнения термоэлементами плотного. Панельное исполнение ТЭГ удобно в изготовлении, технология ее создания проста и поддается механизации. Данная схема наиболее часто используется при создании ТЭГ большой мощности.

К недостаткам панельной схемы относятся:

- недостаточно высокие коэффициенты теплопередачи от источника теплоты к термобатарее и от нее к холодильнику;
- трудность создания надежного теплового контакта между материалами теплопроводов и изоляцией;
- невысокая надежность при длительной эксплуатации из-за химического взаимодействия составляющих конструкцию элементов.

Несмотря на перечисленные недостатки на сегодняшний день панельная схема реализации ТЭГ, учитывая ее многочисленные положительные стороны - одна из основных в термоэлектрогенераторостроении.

Радиальная конструкция (рисунок 14.1, б) строится на основе применения трубчатого теплообменника, со стенками которого контактирует термобатарея. Внутри теплообменника располагается источник теплоты: различного рода теплоносители, радиоизотопы, горячие газы или ТВЭЛы атомных реакторов.

Если в качестве источника теплоты применяется радиоизотоп, то к нему прикрепляются через изоляцию кольцевые, если оболочка цилиндрическая, или плоские, если она имеет вид многогранника, полупроводниковые термоэлементы. В данном случае проектирование ТЭГ встречает такие же трудности, что и в случае панельного исполнения ТЭГ. Если же в качестве источника теплоты применяется теплоноситель в виде жидкого металла или насыщенного пара, то в этом случае ТЭГ представляет собой классический теплообменный аппарат. При этом также могут быть применены кольцевые или плоские термоэлементы. Движение носителей теплоты в этих ТЭГ часто принудительное, что приводит к потерям энергии на прокачку, но зато увеличивается коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к термоэлементам, а также улучшается эффективность применения тепловой энергии.

Радиальная схема является единственно приемлемой для случая использования газового нагрева - горячих газов от горелок различного типа или газовых отходов различных технологических процессов в тепловых машинах, двигателях внутреннего сгорания, реактивных двигателях и т. п. Основная задача проектировщика при этом - создание конструкции, наиболее эффективно использующей тепло выходящих газов.

Применение твэлов в радиальной конструкции такое же, что и для радиоизотопов, однако здесь возможно применение теплообменника значительной длины, что дает возможность создавать ТЭГ большой мощности.

Тепло от термобатарей в радиальной схеме отводится путем излучения в окружающую среду с помощью ребер радиаторной системы, или же теплоносителем, причем первый способ более рационален в случае использования плоских, а второй - в случае кольцевых термоэлементов.

Достоинством радиальной схемы является высокий коэффициент теплопередачи от источника тепла к горячим спаям термобатареи и от нее к охлаждающему теплоносителю. Другое преимущество - компактность всего ТЭГ при удобстве технологии изготовления и сборки.

К недостаткам радиальной схемы следует отнести неполное использование тепла в случае нагрева от газовой горелки и, в меньшей степени, нагрева изотопами, а также трудность конструирования при использовании указанных источников тепла ТЭГ значительной мощности. Так же как и в случае панельной конструкции, трудно обеспечить необходимую механическую и термическую прочность.

Радиальная конструкция ТЭГ, при учете ее важных положительных сторон, является в настоящее время основной для ТЭГ малой и средней (до 1 кВт) мощностей.

Шаровая схема называется так достаточно условно, так как под ней понимается конструкция, в которой термобатарея со всех сторон окружается источником тепла (см. рисунок 15.1, в). При этом форма поверхности в общем случае может быть многогранной. Термоэлементы в этой конструкции используются только плоские, в соответствии со своей формой расположенные в ТЭГ и сопряженные с поверхностью нагрева. Источник нагрева практически всегда - радиоактивный изотоп. Отвод теплоты производится с применением теплоносителя или излучением. Основное преимущество - практически полное использование выделенного источником тепла. Недостатки следующие: большая сложность технологии изготовления и сборки, невозможность создать на этом принципе ТЭГ большой мощности и ограниченность применения различных источников тепла. Поэтому шаровая схема очень редко встречается в ТЭГ.

Короткозамкнутая конструкция ТЭГ применяется для получения токов большого значения (сотни и тысячи ампер) при малом напряжении. Такие генераторы требуются для питания, например, электромагнитных насосов. Источник тепла для данной конструкции располагается между полупроводниковыми термоэлементами n- и p-типов, имеющими площадь, часто равную даже площади панельной термобатареи (см. рисунок 16.1., г). К ветвям термоэлектрических элементов крепятся холодильники. Таким образом, в этой конструкции обеспечивается совпадение направления теплового потока с направлением электрического тока. Электрическая изоляция и коммутация не применяются, что в значительной мере повышает термодинамический КПД ТЭГ. Механические крепления в этом случае являются проводниками тока и теплоты. Их сечения по отношению к сечению ветви полупроводникового элемента (с учетом их удельных электрических сопротивлений) подбирают таким образом, чтобы потери тока не превышали 5-8%.

Источниками теплоты в короткозамкнутом ТЭГ являются теплоносители, радиоактивные изотопы и ТВЭЛы атомного реактора.

Так как и в случае панельного ТЭГ, в этой схеме необходимо снять механические и термические напряжения, особенно в местах контакта. Короткозамкнутый ТЭГ охлаждается только посредством теплоносителя, циркулирующего в теплопроводе.

Преимущества короткозамкнутой конструкции - увеличение КПД Карно за счет отсутствия изоляции и коммутации, разнообразие применяемых источников тепла и простота изготовления. Недостаток - существенные электрические и тепловые потери по замкнутому контуру. Применяются короткозамкнутые ТЭГ в основном в лабораторных и проектных работах. В перспективе ТЭГ могут использоваться в генераторах большой мощности (сотни и тысячи киловатт) для получения высоких токов при малых напряжениях. В зависимости от способа подвода теплоты к спаям ТЭБ ТЭГ делятся на реакторные, изотопные, генераторы на органическом топливе и солнечные. Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных типов.

Реакторные ТЭГ.

До настоящего времени в атомных энергетических установках использовалась в подавляющем числе случаев многоступенчатая схема преобразования тепловой энергии деления атома в электрическую с применением турбин и машинных генераторов тока. Однако данная схема не обеспечивает большой КПД агрегата из-за ограничения рабочей температуры цикла и тепловых потерь. При этом надежная длительная работа таких систем снижается из-за низкой прочности и термостойкости используемых конструкционных материалов турбин. В аппаратах, непосредственно преобразующих тепловую энергию деления атома в электрическую, большинство из этих недостатков отсутствуют. Данное обстоятельство в перспективе дает возможность получить более высокий КПД и удельную мощность при большей эффективности, надежности и компактности.

Одна из особенностей реакторных ТЭГ - радиоактивность топлива, представляющая определенную опасность для человека. Поэтому при разработке ТЭГ указанной стороне вопроса должно уделяться большое внимание. И если в случае стационарных атомных станций большой мощности данная проблема относительно успешно решена, то для передвижных атомных станций, в том числе и космических, она остается все еще актуальной.

Примером ТЭГ реакторного типа может служить генератор «Ромашка», изображенный на рисунке 14.2. В нем получаемая в активной зоне быстрого реактора теплота передается на ТЭБ, закрепленную на наружной поверхности отражателя. Ядерный реактор представляет собой полый цилиндр, изготовленный из металлического бериллия, внутри которого размещены пластинчатые ТВЭЛы (материал - дикарбид обогащенного (90% U^{235}) урана). Вес урана в активной зоне 49 кг. Боковой отражатель собран из коаксиально расположенных элементов, изготовленных из бериллия и графита. Торцевые отражатели получены из металлического бериллия. Термоизоляция применяется для устранения утечек тепла через торцы. Температура в середине активной зоны $1700^{\circ}C$ при температуре ТВЭЛов $1900^{\circ}C$. В ТЭГ предусмотрена

система регулирования, состоящая из четырех стержней, расположенных в боковом бериллиевом отражателе, и нижнего торцевого отражателя.



Рисунок 14.2 - ТЭГ
«Ромашка»

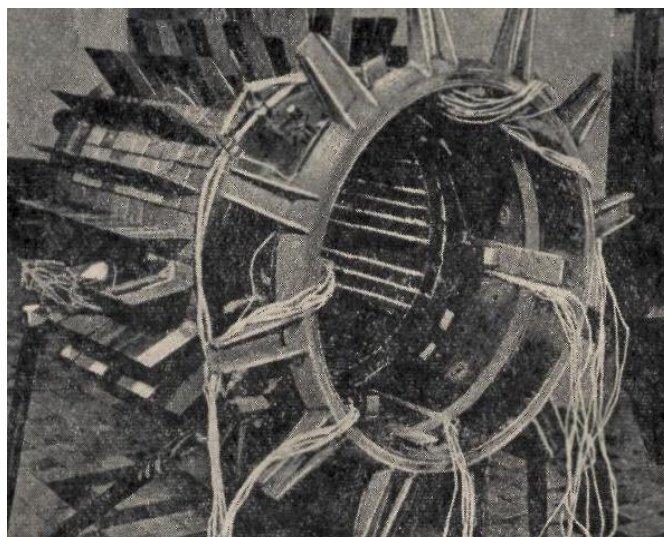


Рисунок 14.3 - ТЭБ
«Ромашка»

ТЭБ «Ромашки» (рисунок 14.3) включает в себя термоэлементы, изготовленные на основе сплава германий-кремний. Термоэлемент состоит из двух столбиков полупроводника р- и n-проводимости, соединенных по горячей стороне коммутационной пластиной. По холодной стороне пары столбиков полупроводникового материала соединяются между собой в единую цепь. Весь ТЭГ разбит на четыре группы элементов, каждая из которых в свою очередь имеет независимые выходы. Внутри каждой группы все термоэлементы скоммутированы в четыре параллельные цепи. Данная электрическая схема позволяет исследовать характеристики как отдельных групп термоэлементов, так и всего ТЭГ при последовательном и параллельном соединении и обеспечивает значительную надежность конструкции. Режим работы ТЭГ, а, следовательно, и его мощность определяются допустимым уровнем температуры элементов реактора и преобразователя и возможностями отвода теплоты.

Мощность вырабатываемой электрической энергии составляет 500-800 Вт при температурах бериллиевого отражателя 980-1200° С и основания охлаждающих ребер 550° С. К.п.д. реактора-преобразователя составляет 1,5-2%. При параллельном соединении всех термоэлементов ТЭБ вырабатывает ток силой 88 А.

Изотопные ТЭГ.

В настоящее время все больше внимания уделяется созданию малогабаритных автономных источников электрической энергии на основе радиоактивных изотопов низкой и средней мощности. Такие генераторы находят применение для питания энергией аппаратуры, работающей в труднодоступных районах и предназначенной для работы длительное время. В подобных ТЭГ в качестве изотопных элементов используются Sr^{90} , Cs^{137} , Po^{210} , Ce^{144} , Pu^{238} .

Изотопные ТЭГ состоят из корпуса, теплового и изотопного блока, ТЭБ, теплового регулятора, устройства для обеспечения перегрузки ТЭБ и радиационной защиты. На

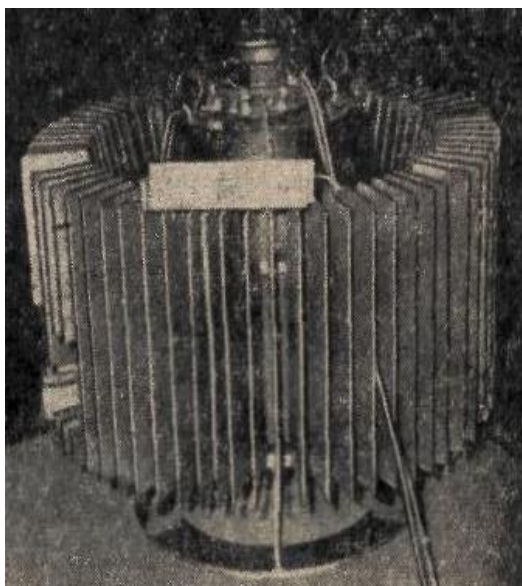


Рисунок 14.4 - ТЭГ с Ce^{144} .

рисунке 14.4 представлен внешний вид изотопного ТЭГ на базе изотопа Ce^{144} , разработанного в России.

Тепловой блок применяется для размещения в нем изотопного источника и конструктивно выполнен в виде полого вольфрамового цилиндра диаметром 100 с боковой стенкой толщиной 20 и днищем толщиной 40 мм. Блок закрыт полусферической крышкой, крепящейся к цилиндру накладным кольцом. Изотопный блок выполнен в виде двойной ампулы, изготовленной из нержавеющей стали, внутри которых размещается стакан, содержащий расплав молибдата церия.

Тепловой блок установлен на ТЭБ, состоящей из 97 термоэлементов. ТЭБ находится в специальном корпусе и опирается на основание в виде цилиндрической медной пробки. Для поддержания требуемого температурного режима работы ТЭБ в состав ТЭГ введены органы теплового регулирования, в состав которых входят специальные экраны и привод регулятора с редуктором. Тепловой блок, ТЭБ и устройства контроля помещены в цилиндрический корпус. Сверху корпус закрывается свинцовой крышкой. ТЭБ снабжен радиационной защитой.

ТЭГ на органическом топливе.

ТЭГ, нагрев спаев которых производился с помощью органического топлива, были первыми в мире промышленными устройствами подобного рода. Впервые такие ТЭГ были разработаны в СССР. Примером генератора на органическом топливе может

служить «партизанский котелок», в дно которого помещалась ТЭБ, нагреваемая от костра, охлаждение которой производилось кипящей водой. «Партизанский котелок» был разработан в 1942 г., состоял из ТЭБ, ветви которой изготавливались из ZnSb-константан. При разности температур 250-300° С ТЭГ обеспечивал к.п.д. 1,5-2%.

В настоящее время наибольшее распространение получили ТЭГ на органическом топливе для станций катодной защиты. Катодная защита предотвращает развитие коррозии на металлических трубопроводах путем подачи на них отрицательного потенциала, препятствующего окислению железа.

Примером такого ТЭГ является генератор ТЭГ-50, изображенный на рисунке 14.5, мощностью 50 Вт и напряжении 8 В. Инфракрасная горелка, использующая природный газ, расположена в центре устройства и обеспечивает температуру горячих спаев ТЭБ на уровне 350-400° С. Тепло отводится за счет естественной конвекции,

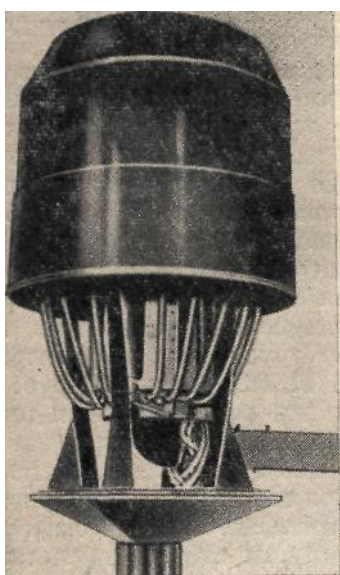


Рисунок 14.5 - Внешний вид ТЭГ-50

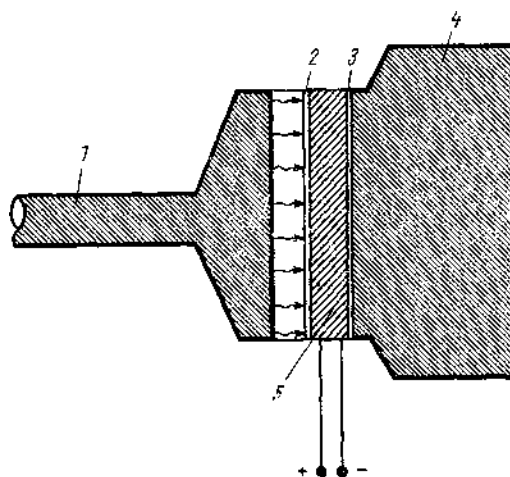


Рисунок 14.6 - Схема ТЭГ для радиорелейной станции:

Для питания автоматической радиорелейной станции используется ТЭГ, работающий на пропане (рисунок 14.6). В его состав входят газовая горелка, обогревающая горячие спаи плоской ТЭБ, непосредственно ТЭБ и охлаждающие ребра. Пропан находится в специальном баллоне, давление в котором регулируется специальными клапанами. ТЭГ дает возможность получать электрический ток силой 0,5 А при напряжении ~12 В.

Солнечные термоэлектрогенераторы.

Первыми ТЭГ были генераторы, использующие энергию солнечных лучей. Первые упоминания о них относятся к концу XIX - началу XX. Основной их составляющей частью являются концентраторы солнечной энергии.

Солнечные ТЭГ с концентраторами солнечной энергии по своим конструктивным особенностям делятся на генераторы с одним концентратором и расположенной в его фокусе ТЭБ и с большим числом маленьких концентраторов, в фокусе которых находится один термоэлемент. Главной задачей при конструировании солнечных ТЭГ - создание равномерной температуры горячих спаев ТЭБ, размещаемой в фокусе, поскольку поток тепла в фокальном пятне распределяется по кривой Гаусса. Этот вопрос решается различными путями, хотя следует отметить, что лучшее решение пока не найдено.

Примером солнечного ТЭГ может служить генератор, представленный на рисунке 14.7. В состав его входит точный зеркальный концентратор диаметром 2 м, в фокусе которого находится плоская ТЭБ, выполненная из ZnSb-константана. На горячей стороне термобатареи находится медная плита толщиной 5 мм, к шлифованной

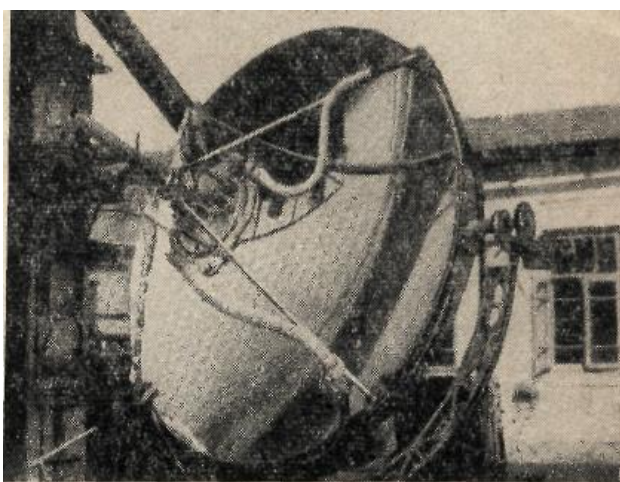


Рисунок 14.7 - Солнечный ТЭГ

поверхности которой через слюдяную электроизоляцию прижимаются горячие спаи термоэлементов. Тепло от опорных спаев ТЭБ отводится водой. При разности температур 400°C мощность установки составляет 20 Вт при напряжении 20 В. К.п.д. ТЭГ равняется 1,42 %.

Выравнивание температуры горячих спаев ТЭБ осуществляется по-другому в солнечном ТЭГ мощностью 10 Вт, а точнее - применением фацетного концентратора диаметром 1 м. Фацетный концентратор состоит из большого количества концентрически расположенных плоских зеркал. Каждое зеркало закрепляется на каркасе с помощью шарнир таким образом, что оно может быть сфокусировано в

любую точку ТЭБ. Специальной фокусировкой каждого фацета в отдельности на горячем спае ТЭБ достигается равномерное распределение температур по ее площади. ТЭБ состоит из десяти ТЭМ, каждый в свою очередь имеет 18 последовательно соединенных термоэлементов. Горячие спаи ТЭБ непосредственно освещаются солнечными лучами, а холодные охлаждаются проточной водой.

14.3. Возможности практического использования термоэлектрических генераторов с разделением источников тепла и холода.

Создание эффективных ТЭГ в принципе на сегодняшний день может быть осуществлено различными конструктивными решениями.

Среди них наиболее целесообразными представляются следующие конструктивные модификации.

1. ТЭБ представляет собой самостоятельный (автономный) узел, а подача к ее спаям теплоты от источников осуществляется непосредственно за счет теплопередачи или путем использования специальных теплоносителей.

2. Изготовление отдельного (микромодульного) элемента совместно с термоэлементом (ТЭ) (ТЭБ). При этом могут быть варианты разборного и неразборного сочленения ТЭГ с источниками теплоты.

3. ТЭБ представляет собой автономный узел, а его сопряжение с источниками теплоты и холода производится посредством специальных теплопроводов.

Рациональным является выявление наиболее целесообразных конструктивных направлений применительно к типичным условиям эксплуатации аппаратуры, а также условий, при которых каждый из них будет иметь свои специфические преимущества.

Охлаждение (нагрев) спаев ТЭГ при помощи обработанного воздуха или жидкости имеет ряд особенностей, существенно ограничивающих область ее использования. К этим особенностям в первую очередь следует отнести следующие:

1. Для транспортировки теплоносителя необходимы вентиляторы или насосы.

2. Увеличение габаритов, вызываемое необходимостью теплоизоляции каналов теплоносителя, а также непроизводительными затратами энергии для компенсации теплотерь в каналах теплоносителя и тепловыделений вентилятора (насоса).

3. Сосредоточение источников холода и тепла в одном месте вызывает соответствующий рост удельных тепловых потоков на теплообменных поверхностях (как по холодной, так и по горячей сторонам ТЭБ), что, как правило, требует принудительного теплообмена, который не только усложняет установку, но, главное, увеличивает ее габариты.

4. Невозможно эффективно использовать ТЭБ в ТЭГ, не имеющем специально приспособленных каналов для теплоносителя.

Наиболее желательное конструктивное решение – непосредственный контакт спаев ТЭБ и источников тепла и холода. В этом случае тепловое сопротивление между ТЭГ и источниками теплоты минимальное, эффективность преобразования разности температур между спаями ТЭБ максимальная.

Однако, несмотря на достоинства такого способа конструирования ТЭГ в его практике эксплуатации часто возникает необходимость отделить источник холода и тепла от его потребителя. В случае, если теплоносителем является фреоновый агрегат, это условие частично удовлетворяется, т. к. собственно компрессор с двигателем и испаритель несколько отдалены друг от друга. При использовании в качестве генератора электроэнергии ТЭГ такое разделение источников теплоты затруднительно.

Возможным конструктивным решением дистанционного разделения источника холода (тепла) и ТЭГ является использование теплопроводов, изготовленных из материалов с большой теплопроводностью и соответственно обладающих малым тепловым сопротивлением в направлении теплового потока. Практически, теплопровод представляет собой массивный стержень, изготовленный, как правило, из меди. В случае использования металлического теплопровода источник и потребитель холода

могут быть удалены друг от друга на небольшое расстояние; однако они оказываются жестко связанными друг с другом возникают дополнительные теплопритоки к теплопроводу, обладающему относительно большой поверхностью; резко возрастают вес и габариты устройства.

Использование теплообменников с различными теплоносителями также позволяет несколько отделить источник холода от его потребителя. Однако в этом случае необходимо иметь специальное насосное устройство, прокачивающее теплоноситель, что значительно усложняет систему и связано с большими тепловыми потерями.

Эксплуатационные характеристики ТЭГ в значительной степени определяются конструктивным выполнением систем теплообмена на холодной и горячей сторонах ТЭБ.

Необходимость сведения к минимуму тепловых потерь, следствием чего является повышение энергетической эффективности ТЭУ, вынуждает конструкторов располагать системы теплообмена непосредственно на ТЭБ.

Однако в наиболее часто встречающихся случаях, когда теплосъем осуществляется воздушными радиаторными системами с конвекционным либо принудительным теплообменом с окружающей средой, это решение влечет за собой и ряд недостатков, основными из которых являются: наличие тепловых потерь за счет теплообмена между холодной и горячей радиаторными системами, расположенными друг от друга на расстоянии равном высоте термоэлемента; необходимость распределить тепловой поток от места с большой плотностью – ТЭБ равномерно на всю поверхность радиатора теплосъема, что значительно увеличивает сечение элементов радиатора вдоль направления теплового потока и повышает весовые и габаритные характеристики системы теплосъема; для интенсификации теплообмена радиатор должен быть изготовлен из материала с высокой теплопроводностью (чаще всего медь, реже алюминий). Наиболее приемлемым методом, позволяющим практически устранить, либо значительно уменьшить перечисленные недостатки является сочетание радиаторной системы с устройством, выполненным в виде высокотеплопроводного цельнометаллического теплопровода или работающим по циклу испарение-конденсация и получившим название испарительный тепловой термосифон.

Использование тепловых термосифонов особенно эффективно в технике термоэлектрического охлаждения. Как известно, ТЭБ является геометрически сосредоточенным узлом, на горячих спаях которого выделяется значительная тепловая энергия. В связи с этим интенсификация теплосъема с ТЭБ является весьма важным. Если при радиаторной системе с принудительным обдувом коэффициент теплоотдачи, приведенный к спаям ТЭБ доходит до $32 \cdot 10^2$ Вт/м², при жидкостном теплосъеме до $8 \cdot 10^3$ Вт/м², то при использовании теплового сифона коэффициент теплоотдачи достигает величины $1,6 \cdot 10^6$ Вт/м². Кроме интенсификации теплообмена и разделение объекта теплосъема от радиаторной системы, использование тепловых сифонов позволяет решить еще две чрезвычайно важные для техники термоэлектрического приборостроения задачи. Одна из них создание устройства с односторонней теплопроводностью, т.е. своеобразного «теплового ключа». Вторая задача -

использование ТЭУ в циклическом режиме работы, что необходимо в тех случаях, когда по условиям эксплуатации не требуется непрерывного обеспечения электропитания.

Конструкции современных термоэлектрических генераторов электрической энергии

Мощность современных ТЭГ колеблется от нескольких микроватт до нескольких десятков киловатт, КПД преобразования - от 2 до 10%, срок службы - от 1 года до 25 лет, стоимость установленной мощности - от \$12 до \$190 на 1 Вт.

ТЭГ для дачников, рыбаков, охотников, геологов, туристов, альпинистов, предлагаются ТЭГ мощностью от 4,5 до 12 Вт выполненные в виде настольной лампы или походных котелков, являющихся источниками постоянного тока. Их можно использовать для освещения, подзарядки аккумуляторов, питания радиоприемников, телевизоров, радиостанций, магнитофонов, компьютеров. Источниками тепла для них являются газовая горелка или плита, примус, печка, костер и т.д. Для катодной защиты магистральных нефтепроводов и газопроводов от коррозии и для питания различно контрольно-регулирующей аппаратуры используются ТЭГ мощностью до 150 Вт, работающие на природном и попутном газе. Для коттеджей и загородных домов разрабатывается ТЭГ мощностью 200 Вт. Он представляет собой газовый котел, вырабатывающий, одновременно, тепло для отопления и электроэнергию. Это позволяет обеспечить бесперебойное электропитание системы отопления (автоматики, циркуляционных насосов), что делает ее полностью независимой от внешней электросети. Кроме того, это устройство может являться резервным источником электропитания для широкого спектра бытовых приборов.



Рис.14.8. Внешний вид ТЭГ ГТУ-12-12

На рис.14.8. изображен ТЭГ ГТУ-12-12 Генератор предназначен для питания бытовой радиотелеаппаратуры, средств связи, освещения и подзарядки аккумуляторов. Он преобразует тепло бытовых источников (корогаза, примуса, газовой горелки, печки, костра) в электрическую энергию.

В условиях, удаленных от постоянного электроснабжения, генератор может быть использован для: подзарядки аккумуляторов мобильного телефона, радиостанции, видеокамеры, эхолота, навигатора, ноутбука, автомобиля; обеспечения электроэнергией маломощных потребителей - радиоприемника, магнитофона, миникомпьютера, телевизора; локального освещения (источниками теплоты могут служить газовая или бензиновая горелка, корогаз, примус, печь с конфорками, угли костра и любые другие источники с открытым пламенем).



Рис.14.9. Внешний вид ТЭГ ГТГ-30-12

ТЭГ газовый ГТГ-30-12 (рис.14.9.) предназначен для обеспечения электроэнергией маломощных потребителей. Он преобразует тепло продуктов сгорания природного газа, пропана, пропанбутановой смеси в электрическую энергию. Генераторы эксплуатируются под навесом или в проветриваемых помещениях при температуре от -30 до +50 град. С и относительной влажности до 90 %.

ТЭГ ГТГ-150Н (рис.14.10.) применяется для комплектации автономных источников электроэнергии мощностью от 150 до 900 Вт, которые используются для питания средств радиорелейной связи и катодной защиты газопроводов. Топливом для генератора служат: природный газ, пропан, пропан-бутановая смесь.



Рис.14.10. Внешний вид ТЭГ ГТГ-150Н

ТЭГ ГТ-4,5-12 (рис.14.11.) предназначен для использования в качестве источника постоянного тока и освещения. Он преобразует тепло продуктов сгорания керосина лампы в электрический ток. Генератор эксплуатируется в помещениях, защищенных от прямого воздействия ветра и осадков.



Рис.14.11. Внешний вид ТЭГ ГТ-4,5-12

В настоящее время растет интерес к использованию термоэлектрических генераторных модулей в бытовых устройствах. В первую очередь это касается возможности питания маломощных потребителей электроэнергии - радиоприемники, сотовые и спутниковые телефоны, переносные компьютеры, устройства автоматики и т.п. от имеющихся источников тепла. ТЭГ, в котором отсутствуют вращающиеся, трущиеся и какие-либо другие изнашиваемые части, позволяет непосредственно получать электричество из любого источника тепла: выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, горячей воды геотермальных источников, "бросового" тепла ТЭЦ и т.п. На рис. 14.12. изображен внешний вид генератора 1TG-8, изготавливаемого ИПФ Криотерм (г. Санкт-Петербург). Конструктивно генератор выполнен в виде алюминиевого ковшика с внутренним объемом около 1 л, в донной части которого установлены генераторные модули.



Рис.14.12. Внешний вид ТЭГ 1TG-8

Необходимый для работы генератора перепад температур достигается при разогреве ковшика, например, пламенем костра. Вода, нагреваемая внутри ковшика может идти на приготовление пищи или на другие цели. Данный генератор в первую очередь предназначен для использования в глухих, труднодоступных местах для подзарядки элементов питания индивидуальных средств связи и навигации, освещения и т.п. Он незаменим для охотников, туристов, моряков, сотрудников спасательных и специальных служб, вынужденных долгое время находиться вдали от источников центрального энергоснабжения. Преимуществом генератора является малый вес и объем, высокая удельная генерируемая мощность, функциональность и высокая надежность. Конструкция генератора исключает возможность его перегрева при правильном использовании. В качестве дополнительной опции к генератору

предлагается ступенчатый стабилизатор напряжения с диапазонами 3 В - 6 В - 9В -12 В и переходники для зарядных устройств.

Почвенные термоэлектрические генераторы (ПТЭГ) (рис.14.13.) предназначены для обеспечения питанием небольших автономных наземных и подземных дистанционных систем, которые включают в себя различные датчики и устройства связи. Перспективным является использование ПТЭГ для питания сигнальных устройств на неэлектрофицированных участках дорог, для обеспечения работы автономных агрометеорологических комплексов в отдаленных и пустынных районах.



Рис.14.13. Внешний вид ПТЭГ

Особенно эффективным является применение ПТЭГ в системах охранной сигнализации. Термоэлектрический источник электрической энергии работает на основе прямого преобразования тепловой энергии почвы в электрическую. Корпус почвенного термоэлектрического генератора выполнен из био- и гидроустойчивого теплоизолирующего материала, концентраторы защищены антикоррозионным покрытием. На рис.14.14. представлен ТЭГ Altec 8020.



Рис.14.14. Внешний вид Altec 8020

Он предназначен для преобразования в электрическую энергию промышленных тепловых отходов и отходов тепла от тепловых машин (двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и др.). Является дополнительным источником энергии, которая может быть использована как для внутренних потребностей, так и для передачи ее во внешнюю электрическую сеть. Использование таких генераторов обеспечивает экономию топливных ресурсов на 5-7%.

Принцип работы ТЭГ основывается на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую путем использования термоэлектричества. В состав ТЭГ входят ТЭМ и

теплообменники горячего и холодного контуров. Теплообменники горячего контура передают тепло к ТЭМ высокотемпературной силиконовой жидкостью. Теплообменники холодного контура отводят тепло от ТЭМ проточной водой. В корпусе ТЭГ предусмотрены штуцеры входа и выхода холодной проточной воды и штуцеры для подключения теплоносителя. Внешняя нагрузка подключается к клеммам, размещенным на передней панели термогенератора.

Мощность современных ТЭГ колеблется от нескольких микроватт до нескольких десятков киловатт, КПД преобразования - от 2 до 10%, срок службы - от 1 года до 25 лет, стоимость установленной мощности - от \$12 до \$190 на 1 Вт. В России и США разработаны перспективные проекты ядерных термоэлектрических установок, мощность которых достигает сотен и тысяч киловатт.

ТЭГ на органическом топливе нашли наибольшее практическое применение в области электро- и теплоснабжения автономных объектов в нефтегазовой промышленности, метеорологии, навигации, сельском хозяйстве, армии и в быту. В качестве источника теплоты в них используются продукты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива. С середины 70-х гг. по настоящее время на магистральных газопроводах России успешно эксплуатируется свыше 12 тыс. газовых низкотемпературных ТЭГ первого поколения (УГМ-80, УГМ-80М) и двухкаскадных ТЭГ второго поколения (ГТГ-150) с инфракрасными горелками мощностью от 80 до 150 Вт, разработанных НПО "Квант" и серийно выпускаемых ОАО "Позит". Канадская фирма "Global Thermoelectric" выпустила в 90-е гг. более 4 тыс. газовых среднетемпературных ТЭГ мощностью от 30 до 550 Вт, работающих более чем в 40 странах мира. Низкотемпературные генераторы с каталитическими горелками мощностью от 10 до 90 Вт серийно выпускаются в России НПП БИАТОС и в США компанией "Teledyne Energy Systems". На базе генераторов ГТГ-150 и ГТЖ-160 АО "Саратовгазавтоматика" в начале 90-х гг. освоило серийный выпуск автономных источников питания (АИП) мощностью 400, 750 и 900 Вт напряжением 27 В. За рубежом аналогичные АИП с ТЭГ на газовом топливе созданы в Канаде ("Global Thermoelectric"), а АИП на жидком топливе - в Японии. В начале 90-х гг. в России были созданы на предприятии АИТ и выпускаются серийно ОАО "Позит" низкотемпературные бытовые ТЭГ мощностью от 4,5 до 30 Вт и напряжением от 6 до 12 В (ГТГ-4,5-12, ГТУ-15-12 и ГТГ-30-12).

Требуемые уровни электрической мощности ТЭГ - от единиц до нескольких сотен и тысяч киловатт - могут быть обеспечены только в сочетании с ядерными реакторами в качестве источника теплоты. По способу теплопередачи от ядерных реакторов к горячим спаям ТЭГ можно разделить на три типа: вынесенные, в которых ТЭГ размещен вне ядерного реактора, а теплопередача осуществляется циркуляционными теплоносителями; встроенные, в которых ядерный реактор и ТЭГ совмещены в едином блоке, ТЭБ размещены на оболочках ТВЭЛ или на отражателе, а теплопередача осуществляется теплопроводностью; и промежуточные, в которых отвод теплоты от ядерного реактора осуществляется тепловыми трубами. Отвод теплоты от холодных спаев ТЭГ всех типов осуществляется хладагентом или излучением. Начиная с 60-х гг.

и по настоящее время, ведущими предприятиями бывшего СССР (РНИЦ Курчатовский институт" Обнинского физико-энергетического института, НПО "Красная Звезда" и "Квант", Сухумский ФТИ), а также такими компаниями США как "Atomic Internation", "Martin Marietta", "Westinghouse Electric Co.", "General Electric Co." создан и опробован в эксплуатации ряд уникальных ядерных термоэлектрических энергоустановок.

14.4. Расчет термоэлектрического генератора электрической энергии

Теплоэнергетические приборы, основанные на использовании термоэлектрических эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона, предназначенные для непосредственного преобразования теплоты в электрическую энергию и обратно, называются термоэлектрическими устройствами. В их состав входят термоэлектрические преобразователи энергии (термоэлементы), состоящие из ветвей, изготовленных из полупроводниковых материалов и коммутационных компонентов. Термоэлектрическое устройство, содержащее более двух последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, называется ТЭБ. Термоэлектрическое устройство, предназначенное для преобразования тепловой энергии в электрическую, называется ТЭГ.

ТЭГ (рис.14.15.) состоит из блока термоэлементы электрически соединенных между собой и образующих ТЭБ, нагревателя, обеспечивающего приток теплоты, к горячим спаям, и системы охлаждения холодных спаев, который в комплексе называется термоэлектрическим модулем (ТЭМ). Положительные ветви термоэлементов изготавливаются из сплава сурьмы с цинком или сплава сурьмы, теллура и висмута. Отрицательные ветви изготавливают либо из сплава висмута с сурьмой, либо из константановой проволоки. В настоящее время разработано и исследовано многочисленное количество других материалов для ветвей термоэлементов.

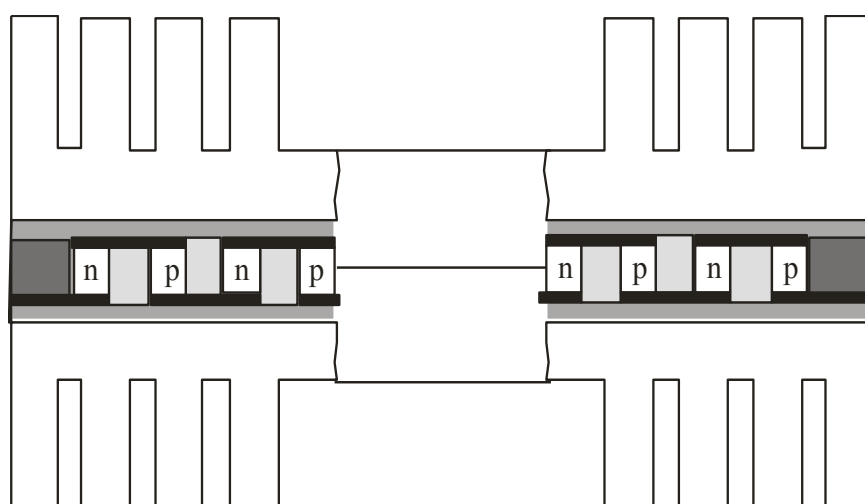


Рис.14.15. Схематическое изображение ТЭМ полупроводникового ТЭГ

При расчете ТЭГ в соответствии с рассмотренной выше тепловой моделью может быть использован стандартный метод его расчета с учетом того, что температура его спаев известна.

С учетом данного замечания рассмотрим работу термоэлемента, работающего в режиме генерации электрической энергии (рис.14.16.). Классический термоэлемент состоит из двух ветвей, которые электрически с помощью коммутационных компонентов соединены последовательно. Ветви изготавливаются из полупроводникового термоэлектрического материала: один р-, а другой n-типа проводимости. Наличие ветвей разных типов проводимости дает возможность складывать их термо-э.д.с. с помощью коммутационных компонентов, которые непосредственно припаиваются к ветвям термоэлемента. К коммутационным компонентам на холодном спае термоэлемента подсоединяется нагрузка R_n .

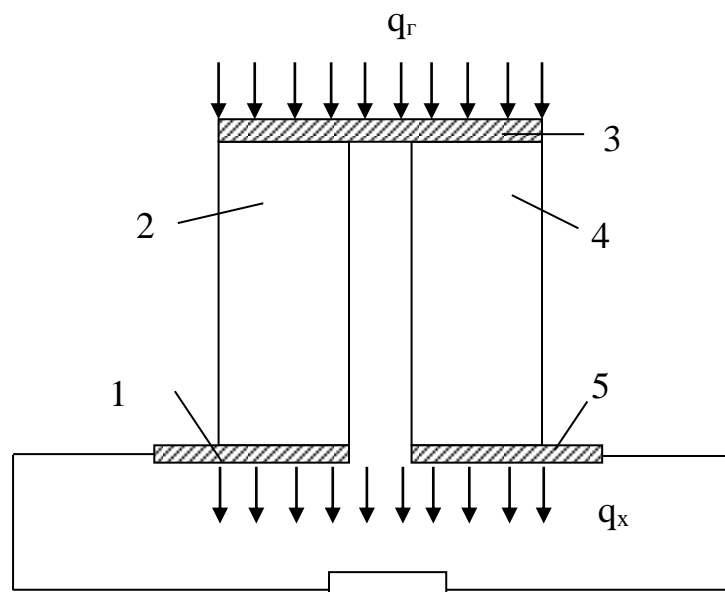


Рис.14.16. Схематический разрез термоэлемента, работающего в режиме ТЭГ

Если к горячему спаю термоэлемента подвести некоторый поток теплоты q_g при температуре T_g , а от холодного спаев отвести некоторый поток тепла q_x при температуре T_x , то под действием перепада температур на его спаев ΔT , согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-э.д.с. $E_{тэ}$. При условии независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E_{тэ} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T, \quad (14.1)$$

где α_p и α_n – абсолютные величины коэффициентов термо-э.д.с. ветвей р- и n-типов соответственно.

Под действием термо-э.д.с. E по замкнутой цепи термоэлемента, включающей полезную нагрузку R_n , потечет электрический ток I .

Внутреннее сопротивление термоэлемента $R_{тэ}$ состоит из сопротивлений ветвей соответственно R_p и R_n , и сопротивления коммутационного компонента R_k :

$$R_{тэ} = R_p + R_n + R_k. \quad (14.2)$$

Представим сопротивление коммутационного компонента в виде относительной величины

$$k = \frac{R_k}{R_p + R_n} \quad (14.3.)$$

а величины сопротивлений ветвей представим через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов.

Тогда

$$R_{тэ} = \left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+k), \quad (14.4.)$$

где S_p и S_n - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и п-типов, ρ_p и ρ_n - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и п-типов; ℓ - длина ветвей;

Полное сопротивление термоэлектрической цепи равно $R_{тэ} + R_n$. Представим также полезную нагрузку в виде относительной величины $K = R_n / R_{тэ}$, которая называется относительной полезной нагрузкой. Тогда общее сопротивление цепи будет равно $R_{тэ}(1+K)$. Таким образом, согласно закону Ома, ток в цепи ТЭБ будет определяться выражением:

$$I = \frac{E_{тэ}}{(1+K)R_{тэ}}, \quad (14.5)$$

а напряжение на нагрузке

$$U = \frac{K}{1+K} E_{тэ}. \quad (14.6)$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая ТЭГ, будет определяться по формуле

$$W_{тэ} = UI = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{E_{тэ}^2}{R_{тэ}} = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+k)}. \quad (14.7)$$

Отношение $\frac{E_{тэ}^2}{R_{тэ}}$ является максимальной электрической мощностью, вырабатываемой в цепи термоэлемента, когда сопротивление этой цепи минимально, т. е. при $R_n = 0$. Указанный случай соответствует режиму короткого замыкания. Значение

$\frac{K}{(1+K)^2}$ определяет уменьшение электрической мощности из-за необратимых джоулевых потерь на внутреннем сопротивлении термокомпонента. Вместе с потерями теплоты за счет конечной теплопроводности термоэлектрических материалов, джоулевы потери являются основными необратимыми процессами в термоэлементе. Энергетические свойства ТЭГ определяются его коэффициентом полезного действия ε - отношением выходной полезной электрической мощности P к тепловой входной мощности:

$$\varepsilon = P / q$$

К.п.д. ТЭГ зависит от:

- свойств полупроводниковых материалов (коэффициента теплопроводности, удельного сопротивления и коэффициента термо-э.д.с.);
- разности температур между спаями ТЭБ;
- отношения сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению термокомпонента.

Максимальное значение к.п.д. термокомпонента определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{макс}} = \frac{(T_1 + T_2) \sqrt{1 + ZT_{\text{cp}}} - 1}{T_2 \sqrt{1 - ZT_{\text{cp}}} + (T_1 / T_2)}, \quad (14.8.)$$

где $T_{\text{cp}} = (T_1 + T_2) / 2$, $Z = (a_1 + a_2)^2 / (\sqrt{\lambda_1 \rho_1} \sqrt{\lambda_2 \rho_2})$

Смысл параметра Z может быть понят исходя из следующих соображений. Термо-э.д.с. ε при разности температур ΔT тем больше, чем больше коэффициент термо-э.д.с. α , а наибольшая мощность на нагрузке пропорциональна величине α^2 / ρ , что то же самое α^2 / σ , где σ - удельная проводимость вещества. Разность температур ($\Delta T = T_r - T_x$) определяется теплопроводностью ветвей ТЭБ λ_1 и λ_2 . Чем меньше значение λ , тем больше к.п.д. преобразователя. На рис.14.17. представлена зависимость изменения температуры генерируемой ЭДС от перепада температур между спаями ТЭГ при различных величинах температуры окружающей среды. Как следует из представленных данных значение вырабатываемой ЭДС напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем большее величина последнего, тем выше значение ЭДС. Данное обстоятельство очевидно и следует из выражения. Также очевидна обратная зависимость ЭДС и значения температуры окружающей среды. Естественно, чем выше температура окружающей среды, тем выше будет температура холодных спаев ТЭГ и соответственно перепад температур между спаями. Из представленного графики можно сделать важный вывод, состоящий в том, что для получения большей величины генерируемой ЭДС необходимо подбирать тепловой аккумулятор с как можно большей температурой плавления. Однако в данном случае необходимо учитывать требования к температурным характеристикам ТЭГ. Ведь большое значение температуры плавления теплового аккумулятора может повлечь за собой несоблюдение требуемого температурного режима термоэлектрических преобразователей энергии, что скажется на надежности функционирования энергосистемы в целом. Поэтому задача подбора

вещества для теплоаккумулятора является задачей оптимизационной и требует учета соблюдения и температурного режима и возможного значения генерируемой ЭДС ТЭГ. На рис.14.18. представлена зависимость изменения к.п.д. ТЭГ от термо-ЭДС. Как следует из представленных данных к.п.д. генератора уменьшается при увеличении генерируемой ЭДС. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина к.п.д. составила порядка 8 %.

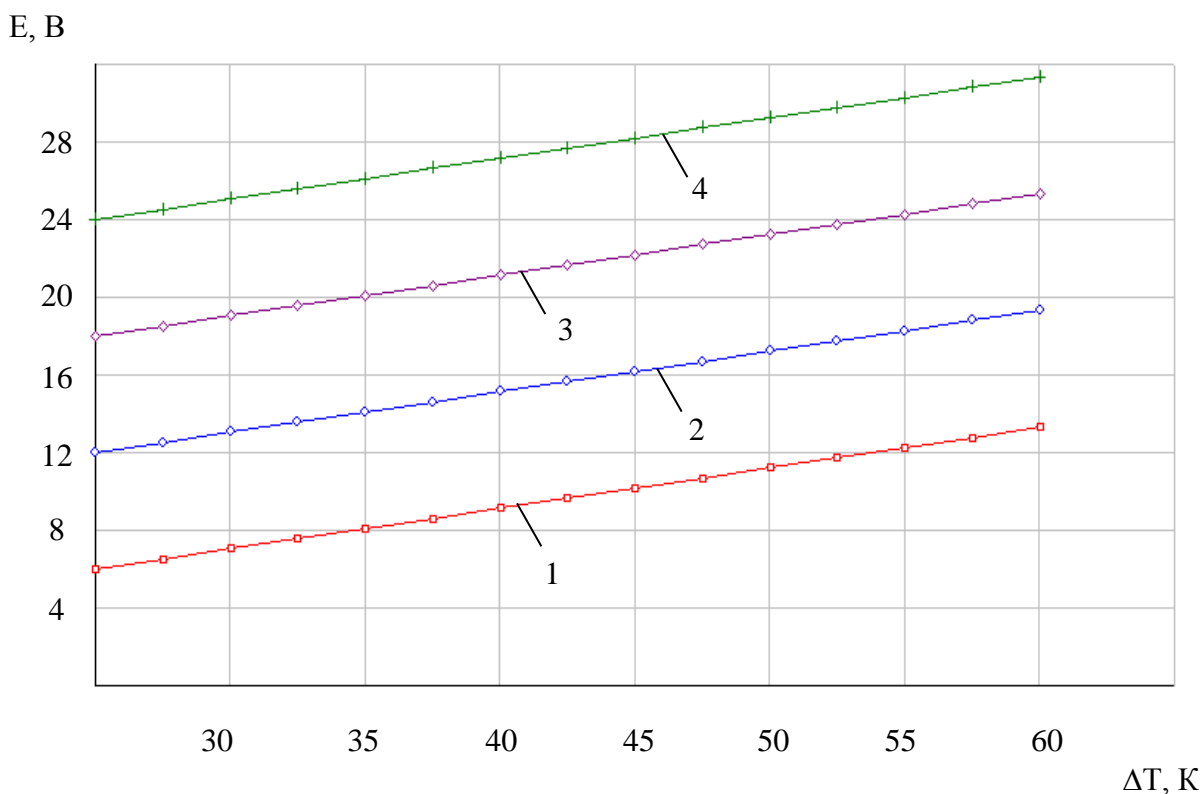


Рис.14.17. Зависимость изменения величины ЭДС от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой
 1 – $T_{cp}=20^{\circ}C$, 2 – $T_{cp}=22,5^{\circ}C$, 3 – $T_{cp}=25^{\circ}C$, 4 – $T_{cp}=27,5^{\circ}C$

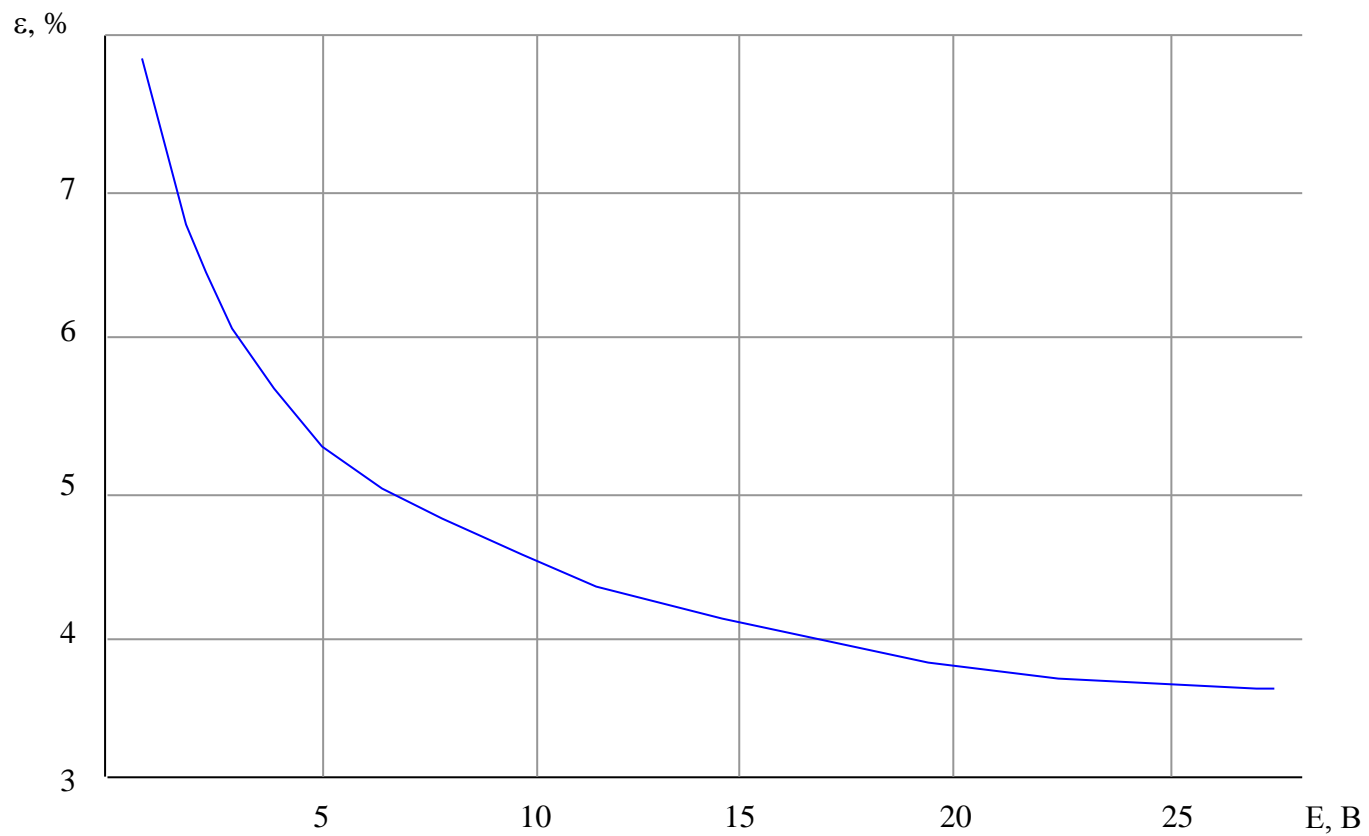


Рис.14.18. Зависимость изменения КПД ТЭГ от термо-ЭДС

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием: Учеб. Пособие. Екатеринбург : УГТУ, 2000.116с.
2. Лихошерст В.И. Системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии: Учеб. Пособие. Екатеринбург : УГТУ, 2000.116с.
3. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992.320с.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.Н. Основы преобразовательной техники: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш.шк., 1983.424с.
5. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи. М.: Изд. Дом. «Додекс», 2001.-384с.
6. Воронина Н.А., Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: Учебное пособие.- Томск: Изд-во ТПУ, 2004.-263с.
7. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие.- Изд.2-е, испр. и доп.-Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.-664 с.
8. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. М.: -Солон-Р, 2001. -327с.
9. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении. Учебное пособие. –Томск, Изд. ТПУ, 2013.-148 с.
10. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. Учебник для вузов.-М.: Издательский дом МЭИ, 2007.-632с.
11. Забродин Ю.С. Промышленная электроника.-М.: Высш.шк., 1982 -298с.
12. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник.- Л.: Энергия, 1985.-322с.
13. Белозерцев В.Н., Некрасова С.О., Сармин Д.В., Угланов Д.А., Шиманов А.А. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора. –Самара: Изд-во СГАУ, 2015.-76с.
14. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.-Киев: Наук. думка, 1979/-768с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Применение полупроводниковой преобразовательной техники-основной способ преобразования параметров электрической энергии.....	4
1.1. Предмет преобразовательной техники.....	4
1.2. Назначение и классификация устройств преобразовательной техники.....	5
1.3. Состав устройств преобразовательной техники.....	7
1.4. История и перспективы развития устройств преобразовательной техники.....	7
Глава 2. Элементы силовых схем вентильных преобразователей.....	10
2.1. Состав силовых схем вентильных преобразователей.....	10
2.2. Силовые диоды. Назначение и классификация силовых диодов.....	11
2.3. Статические характеристики и схема замещения силового диода при низкой частоте.....	12
2.4. Динамические характеристики силовых диодов.....	13
2.5. Параметры силовых диодов.....	15
2.6. Разновидности силовых диодов.....	15
2.7. Тиристоры. Назначение и классификация тиристоров.....	17
2.8. Разновидности тиристоров.....	19
2.9. Транзисторные ключи. Классификация транзисторов.....	20
2.10. Основные параметры биполярных транзисторов.....	23
2.11. Трансформаторы. Назначение и классификация трансформаторов.....	24
2.12. Основные параметры трансформаторов.....	24
2.15. Схемы замещения и характеристики трансформаторов.....	25
Глава 3. Выпрямители тока.....	26
3.1. Классификация и структурные схемы выпрямителей.....	26
3.2. Однофазные выпрямители.....	29
3.3. Многофазные выпрямители.....	31
Глава 4. Вентильные инверторы.....	34
4.1. Классификация инверторов.....	34
4.2. Переход от выпрямительного к инверторному режиму.....	35
4.3. Регулировочные и внешние характеристики ведомого инвертора.....	37
Глава 5. Рекуперирующие и реверсивные преобразователи.....	39
5.1. Классификация рекуперирующих преобразователей.....	39
5.2. Внешние и регулировочные характеристики.....	40
Глава 6. Системы управления ведомых преобразователей.....	41
6.1. Классификация систем импульсно-фазового управления ведомыми преобразователями.....	41
6.2. Требования предъявляемые, к системам импульсно-фазового управления и формы управляющих импульсов.....	46

6.3. Системы управления и регулировочные характеристики реверсивных преобразователей при раздельном управлении.....	48
6.4. Цифровые и микропроцессорные системы управления.....	49
Глава 7. Преобразователи постоянного напряжения.....	52
7.1. Классификация преобразователей постоянного напряжения.....	52
7.2. Непосредственные ППН.....	52
Глава 8. Автономные инверторы.....	55
8.1. Классификация и принципы построения автономных инверторов.....	55
8.2. Автономные инверторы на тиристорах с двухступенчатой коммутацией.....	57
8.3. Автономные инверторы напряжения на транзисторах и запираемых тиристорах.....	57
8.4. Трехфазный мостовой АИН.....	61
8.5. Сравнение автономных инверторов.....	64
Глава 9. Преобразователи частоты.....	65
9.1. Классификация и принципы построения преобразователей частоты.....	65
9.2. Двухвенные преобразователи частоты.....	66
9.3. ДПЧ на основе управляемого выпрямителя и АИН.....	67
9.4. ДПЧ на основе неуправляемого выпрямителя и АИН с ШИМ.....	69
9.5. Рекуперирющие ДПЧ на основе ОПН.....	70
9.6. Рекуперирющие ДПЧ на основе инверторов тока.....	72
9.7. Матричные преобразователи.....	75
Глава 10. Преобразователи переменного напряжения.....	76
Глава 11. Фильтры.....	79
11.1. Сглаживающие фильтры.....	80
Глава 12. Устройства улучшающие энергетические показатели и качество электрической энергии.....	82
12.1. Энергетические показатели и качество электрической энергии.....	82
12.2. Классификация устройств повышающих энергетические показатели и качество электрической энергии.....	83
Глава 13. Элементная база систем управления.....	84
13.1. Контроллеры управления.....	84
13.2. Усилители мощности импульсов управления.....	87
Глава 14. Термоэлектрические генераторы электрической энергии и возможности их использования при разделении источников тепла и холода.....	89
14.1. Конструкции термоэлектрических преобразователей энергии.....	89
14.2. Разновидности термоэлектрических генераторов.....	94
14.3. Возможности практического использования термоэлектрических генераторов с разделением источников тепла и холода.....	102
14.4. Расчет термоэлектрического генератора электрической энергии.....	112

Список литературы118