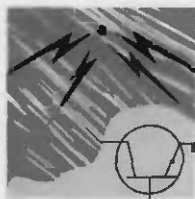


# М ЭЛЕКТРОНИКИ И Р

С. РАМА РЕДДИ

## ОСНОВЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



ТЕХНОСФЕРА



# МИР электроники

С. РАМА РЕДДИ

## Основы силовой электроники

Перевод с английского  
В.В. Масалова  
под редакцией Д.П. Приходько

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2006

**ООО «СТК-ВИКОМ»**



124489, Москва, Зеленоград,  
Панфиловский пр-т, 10, корп. 3  
Тел.: (095) 534-9520, 540-9767  
info@ipower.ru www.ipower.ru

**10-ЛЕТНИЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И МЕЛКОСЕРИЙНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ЗАКАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ И СИСТЕМ ПИТАНИЯ**

**ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ДУГОВЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ  
ЛАМП (НАКАЧКА ЛАЗЕРОВ, СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ,  
УФ-ОСВЕТИТЕЛИ)**

**УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ И АСИНХРОННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

7,5-киловаттный  
блок питания  
импульсного  
лазера



10-киловаттный  
преобразователь  
напряжения  
для заряда  
емкостных  
накопителей



7,5-киловаттный  
блок питания  
непрерывного  
лазера



7,5-киловаттный  
стабилизатор  
тока для дуговой  
газоразрядной  
лампы



150-ваттный  
лабораторный  
блок питания  
короткодуговой  
УФ-лампы  
высокого  
давления



Разрядный  
коммутатор 900В  
1100А для  
систем накачки  
импульсных  
лазеров



Блок управления  
прецизионным  
электроприводом  
(4 шаговых и один  
асинхронный  
двигатель)



Источник питания  
дежурной дуги 1А  
400В для систем  
накачки импульс-  
ных лазеров



Микропроцес-  
сорный модуль  
управления для  
систем накачки  
твердотельных  
лазеров



50-ваттный ИВЭП  
с повышенной  
устойчивостью  
к сложной электро-  
магнитной обста-  
новке (4 выходных  
напряжения)



**С. Рама Редди**

**Основы силовой электроники**

**Москва:**

**Техносфера, 2006. - 288с. ISBN 5-94836-055-5**

В книге описаны основные полупроводниковые приборы силовой электроники, схемы включения и особенности применения. Рассмотрены построение вторичных источников питания, коммутаторы постоянного и переменного тока, управление двигателями, микропроцессорные системы для промышленной электроники. Незаменимое пособие для инженеров-разработчиков и практиков.

Fundamentals of  
**POWER ELECTRONICS**

— S. Rama Reddy —



Alpha Science International Ltd.

Originally published in English as

**Fundamentals of POWER ELECTRONICS**

© 2000 by Narosa Publishing House, New Delhi - 110 002

All Rights Reserved

© 2005, ЗАО "РИЦ "Техносфера",

перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление.

**ISBN 5-94836-055-5**

**ISBN I-84265-056-4 (англ)**



# Содержание

Предисловие	13
Глава 1. Полупроводниковые приборы	14
1.1. Введение	14
1.1.1. Собственный полупроводник	12
1.1.2. Примесный полупроводник	15
1.1.3. $p$ - $n$ -переход	18
1.2. $p$ - $n$ -диод	19
1.3. Биполярный транзистор	21
1.4. Тиристор	23
1.4.1. Двухтранзисторный аналог тиристора	25
1.4.2. Обрато смещенный тиристор	27
1.4.3. Различия между транзистором и тиристором	28
1.4.4. Определение параметров тиристора	28
1.4.5. Методы защиты схем на тиристорах	31
1.4.6. Защита нагрузки от бросков напряжения	32
1.4.7. Последовательная и параллельная работа тиристорov	33
1.4.8. Способы включения тиристорov	35
1.5. Динистор	36
1.6. Симистор	37
1.7. МОП-транзистор	39
1.8. Запираемый тиристор	40
1.9. Биполярный транзистор с изолированным затвором (БИТЗ)	41
1.10. Программируемый тиристор	41
1.11. Тетродный тиристор	42
1.12. Пороговый тиристор	43
1.13. Тиристор с обратной проводимостью	44
1.14. Фототиристор	44
Вопросы и ответы	45
Глава 2. Схемы управления тиристорами	47
2.1. Резистивная схема управления	47
2.2. Резистивно-емкостная схема управления	49
2.3. Схема управления с однопереходным транзистором	50
Задачи	52
Вопросы и ответы	53
Глава 3. Переключающие схемы	54
3.1. Введение	54
3.2. Переключение	54
3.3. Последовательная $LC$ -цепь	55
3.4. Контур ударного возбуждения	56
3.5. Способы выключения тиристора	57
3.5.1. Способ переключения класса А	58
3.5.2. Способ переключения класса В	59



**Эффективность и надежность  
систем промышленной автоматизации:**

- промышленные контроллеры
- панели управления
- частотные преобразователи
- коммутационная аппаратура
- сервосистемы
- роботы

115054, Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 5  
Тел.: (095) 721-2070  
Факс: (095) 721-2071  
[www.mitsubishielectric.ru](http://www.mitsubishielectric.ru)  
[www.mitsubishi-automation.com](http://www.mitsubishi-automation.com)

3.5.3. Способ переключения класса С	60
3.5.4. Способ переключения класса D	61
3.5.5. Способ переключения класса E	62
3.5.6. Способ переключения класса F	63
Вопросы и ответы	64
<b>Глава 4. Фазоуправляемые выпрямители</b>	65
4.1. Введение	65
4.2. Классификация выпрямителей	65
4.3. Параметры выпрямителей	67
4.3.1. Выходные параметры	67
4.3.2. Входные параметры	69
4.4. Однофазные выпрямители	71
4.5. Однополупериодный управляемый выпрямитель с резистивной нагрузкой	71
4.6. Однополупериодный управляемый выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой	72
4.7. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивной нагрузкой	73
4.8. Однофазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель	75
4.9. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой	76
4.10. Двухполупериодный управляемый выпрямитель с индуктивным источником	78
4.11. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с демпфирующим диодом	82
4.12. Полумостовой управляемый выпрямитель	82
4.13. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с одним тиристором	84
4.14. Трехфазный однополупериодный управляемый выпрямитель	84
4.15. Трехфазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель	86
4.15.1. Формы токов в цепи трехфазного двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя	90
4.16. Синхронизация цепи запуска с помощью однопереходного транзистора	95
4.17. Управляющая схема для трехфазного выпрямителя	96
Список формул	98
Задачи	98
Вопросы и ответы	103
<b>Глава 5. Коммутаторы постоянного тока</b>	106
5.1. Введение	106
5.2. Общие положения	106
5.3. Способы управления коммутаторами	108
5.4. Классификация коммутаторов	109



**AEP group**  
ГРУППА КОМПАНИЙ  
"АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК"

HL line 20...30W  
NN line 40...60W  
AR line 80...150W  
для промышленного  
и коммерческого  
применения

-40...+85°C



**AC/DC**  
**DC/DC**

**МОДУЛИ И БЛОКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
МОЩНОСТЬЮ ОТ 3 ДО 1200 Ватт**



**В короткие сроки  
произведем разработку  
источников  
вторичного электропитания  
по Вашему техническому  
заданию**

ООО "Александр Электрик Дон"  
394026, Воронеж, ул. Дружников, 1  
тел/факс: (0732) 519-518, (0732) 763-990

ООО "Александр Электрик источник"  
г. Москва, Сибирский проезд, дом 2, корпус 27-29,  
(станция метро «Окологородский проспект»),  
тел: (095) 510-64-11, (0732) 519-518

e-mail: alexdon@ymail.ru, alexsan@aeps-group.com  
[www.aeps-group.ru](http://www.aeps-group.ru)

**РАДИО РАДИО РАДИО РАДИО РАДИО** Подписка с любого месяца!

**РАДИО**

**Журнал**

**РАДИО**

Адрес редакции: 197045, Москва, Селявостров пер. 10  
Телефон: (095) 207-31-18, факс: (095) 298-77-13  
E-mail: (095) info@radio.ru Сайт: www.radio.ru

Подписной индекс (по каталогу "Роспечати") - 70772

5.5. Коммутатор напряжения	113
5.5.1. Управляющая схема коммутатора напряжения	116
5.6. Коммутатор тока	118
5.7. Коммутатор нагрузки	121
5.8. Коммутатор Джонса	123
5.9. Повышающий коммутатор	125
Задачи	127
Вопросы и ответы	130
<b>Глава 6. Инверторы</b>	131
6.1. Введение	131
6.2. Последовательный инвертор	131
6.3. Параллельный инвертор	134
6.4. Мостовые инверторы	136
6.4.1. Резистивная нагрузка	136
6.4.2. Индуктивная нагрузка	137
6.4.3. Полумостовой инвертор с $RLC$ -нагрузкой	139
6.5. Инвертор Мак-Мюррея (инвертирующий преобразователь)	140
6.6. Инвертор Мак-Мюррея — Бедфорда	142
6.7. Трехфазные инверторы	145
6.7.1. 120-градусный режим работы	145
6.7.2. 180-градусный режим работы	146
6.8. Трехфазный инвертор тока	148
6.9. Управление выходным напряжением инвертора	150
6.9.1. Однократный широтно-импульсный модулятор	150
6.9.2. Многократный широтно-импульсный модулятор	151
6.10. Управление гармоническими составляющими (управление формой напряжения)	153
6.10.1. Коммутация промежуточных отводов в трансформаторе	154
6.10.2. Подключение через трансформатор	154
6.10.3. Использование фильтров	156
6.10.4. Использование широтно-импульсной модуляции	157
Задачи	157
Вопросы и ответы	158
<b>Глава 7. Частотные преобразователи</b>	160
7.1. Введение	160
7.2. Однофазный понижающий частотный преобразователь	160
7.3. Повышающий частотный преобразователь	161
7.4. Частотный преобразователь трехфазного напряжения в однофазное	162
7.5. Частотный преобразователь трехфазного напряжения в трехфазное	164
7.6. Частотные преобразователи однофазного напряжения в трехфазное	165
Вопросы и ответы	166



# ОАО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ»

РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО И ПОСТАВКА ИЗДЕЛИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

430001, РОССИЯ, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 128

На предприятии разработана и внедрена система менеджмента качества на соответствие ГОСТ Р ИСО 9001-2001

## ДИСКРЕТНЫЕ ПРИБОРЫ

ТОКИ ОТ 10 А ДО 10000 А, НАПЯЖЕНИЕ ДО 6500 В  
- ДИОДЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ (до 10000А/6500В)  
- ДИОДЫ ЛАВИННЫЕ (до 4000А/6000В)  
- ОГРАНИЧИТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ (до 4500В/15Дж)  
- ТИРИСТОРЫ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ (до 5500А/6500В)  
- ТИРИСТОРЫ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ И ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ (до 2000А/2400В)  
- ТИРИСТОРЫ АСИММЕТРИЧНЫЕ (до 1000А/2800В)  
- ТРИАКИ (до 1000А/1400В)  
- ОПТОТИРИСТОРЫ (до 80А/1200В)  
- РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫЕ ДИНИСТОРЫ (до 350А/3000В)

## ОХЛАЖДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

ОХЛАДИТЕЛИ ВОЗДУШНЫЕ (мощность рассеивания до 2000Вт)  
ОХЛАДИТЕЛИ ВОДЯНЫЕ (мощность рассеивания до 5000Вт)  
СИСТЕМЫ ПРИКЛИМКА (до 10 кВт)  
ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ЮкВ)

## СИЛОВЫЕ МОДУЛИ

ТОКИ ОТ 10 А ДО 6500 А, НАПЯЖЕНИЕ ДО 4800 В  
ДИОДНЫЕ, ТИРИСТОРНЫЕ, СИМИСТОРНЫЕ, ОПТОТИРИСТОРНЫЕ  
МОДУЛИ - ОДИНОЧНЫЕ КЛЮЧИ, ПОЛУМОСТЫ, НИЗКОЧАСТОТНЫЕ  
И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ (до 1000А/4000В)  
SFRD МОДУЛИ (до 800А/3300В,  $t_r = 0.1+1.0$  мкс)  
ДИОДНЫЕ И ТИРИСТОРНЫЕ МОДУЛИ - ОДНОФАЗНЫЕ  
И ТРЕХФАЗНЫЕ МОСТЫ, НИЗКОЧАСТОТНЫЕ  
И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ (до 200А/1600В)  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СТОЛБЫ (до 50кВ)  
IGBT МОДУЛИ (до 3500А/3300В)  
IGBT ТАБЛЕТОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ (до 1200А/5200В)

## СИЛОВЫЕ БЛОКИ

- СИЛОВЫЕ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ с  
охлаждающим устройством по схемам многофазных выпрямителей,  
регуляторов переменного тока, инверторов и др. схемам  
по требованиям заказчика;  
- ДРАЙВЕРЫ УПРАВЛЕНИЯ (для тиристорных и IGBT модулей)

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ

- железнодорожного транспорта
- энергетики
- черной, цветной металлургии и электротермии
- строительной индустрии

- энергосберегающих приводов
- нефтегазового комплекса
- предприятий машиностроения
- коммунального хозяйства



www.morla.ru~martin/  
e-mail: martin@morla.ru  
т/ф (8342) 48-07-33

www.eivpr.ru  
e-mail: sales\_app@eivpr.ru  
т/ф (8342) 47-16-64

e-mail: nlopt@mail.ru.com

<b>Глава 8. Коммутаторы переменного тока</b>	167
8.1. Введение	167
8.2. Коммутатор переменного тока с использованием симистора	168
8.3. Коммутатор переменного тока с резистивной нагрузкой	170
8.3.1. Среднеквадратическое значение выходного напряжения	171
8.4. Коммутатор переменного тока с индуктивно-резистивной нагрузкой	172
Задачи	173
Вопросы и ответы	175
<b>Глава 9. Практическое применение</b>	176
9.1. Введение	176
9.2. Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя	176
9.2.1. Регулирование изменением напряжения	176
9.2.2. Регулирование изменением частоты напряжения	178
9.2.3. Регулирование изменением сопротивления ротора	181
9.2.4. Схема регенерации потерь мощности в роторе	183
9.3. Торможение асинхронного двигателя	185
9.3.1. Торможение противовключением	185
9.3.2. Динамическое торможение	186
9.3.3. Регенеративное торможение	187
9.4. Система с обратной связью для управления асинхронным электродвигателем	189
9.5. Регулирование скорости вращения электродвигателей постоянного тока	190
9.5.1. Одноквадрантный драйвер электродвигателя постоянного тока	191
9.5.2. Двухквадрантный драйвер электродвигателя постоянного тока	193
9.5.3. Четырехквадрантный драйвер электродвигателя постоянного тока	194
9.6. Торможение электродвигателя постоянного тока	195
9.6.1. Торможение противовключением	195
9.6.2. Динамическое торможение	196
9.6.3. Регенеративное торможение	197
9.7. Система с обратной связью для управления электродвигателем постоянного тока	197
9.8. Регулируемый источник питания	199
9.9. Импульсный источник питания	199
9.10. Электросварка	200
9.11. Нагревание	202
9.12. Регулятор напряжения с гальванической развязкой от нагрузки	204
9.13. Компенсаторы реактивной мощности	206
9.13.1. Компенсация реактивной компоненты нагрузки	207
9.13.2. Стабилизация напряжения в линиях передачи	207

9.13.3. Компенсация реактивной мощности шунтированием	207
9.14. Система возбуждения генераторов переменного тока	211
9.15. Источник бесперебойного питания	212
9.15.1. Источник бесперебойного питания с системой параллельного резервирования	213
9.16. Линия электропередачи высокого напряжения на постоянном токе	215
9.17. Управляемый микропроцессором электропривод	215
9.17.1. Регулирование скорости вращения электродвигателя постоянного тока с помощью микропроцессора	216
9.17.2. Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя с помощью микропроцессора	220
9.17.3. Микропроцессорный привод для синхронного электродвигателя	221
Список формул для приводов электродвигателя постоянного тока	223
Задачи	224
Вопросы и ответы	227
<b>Глава 10. Резонансные инверторы</b>	228
10.1. Статическое преобразование мощности	228
10.2. Преимущества переключения при нулевом напряжении	229
10.3. Недостатки переключения при нулевом напряжении	229
10.4. Резонансный преобразователь со связью по постоянному току	230
10.4.1. Введение	230
10.4.2. Принцип работы	230
10.5. Базовая схема управления биполярным транзистором	232
10.5.1. Особенности схемы управления	232
10.5.2. Описание базовой схемы управления	233
10.6. Однофазный резонансный инвертор	233
10.6.1. Введение	233
10.6.2. Однофазный резонансный инвертор с резистивной нагрузкой	235
10.7. Анализ работы резонансного инвертора с резистивной нагрузкой	238
10.8. Однофазный резонансный инвертор с резистивно-индуктивной нагрузкой	239
<b>Глава 11. Квазирезонансные преобразователи</b>	243
11.1. Общие вопросы	243
11.2. Переключение при нулевом токе	243
11.3. Схемы резонансных ключей	244
11.4. Принцип действия квазирезонансного преобразователя	246
11.4.1. Стадия увеличения тока индуктивности ( $t_0, t_1$ )	249
11.4.2. Резонансная стадия ( $t_1, t_2$ )	249
11.4.3. Стадия разряда конденсатора ( $t_2, t_3$ )	250
11.4.4. Стадия затухания ( $t_3, t_4$ )	251

<b>Глава 12. Схемы управления на основе микропроцессоров</b> .....	252
12.1. Схема управления трехфазными преобразователями, предложенная Хаем, Роем и Перретом .....	252
12.2. Схема управления, предложенная Деваном .....	256
<b>Приложение 1. Практикум по силовой электронике</b> .....	260
1. Измерение характеристик тиристора .....	260
1) Измерение вольтовых характеристик ( $V_g - I_g$ ) .....	260
2) Измерение характеристик запирающего тиристора ( $V_{FB} - I_g$ ) .....	262
2. Исследование схемы запуска с однопереходным транзистором .....	263
3. Измерение характеристик симистора .....	264
4. Исследование RC-схемы запуска тиристора .....	266
5. Исследование схемы коммутации напряжения .....	267
6. Исследование схемы коммутации тока .....	270
<b>Приложение 2. Вопросы и ответы</b> .....	273
Часть 1 .....	273
Часть 2. Выпрямители .....	282
Преобразователи постоянного напряжения в постоянное .....	283
Инверторы .....	284
Дополнительные вопросы .....	285
<b>Литература</b> .....	287

## Предисловие

Настоящая книга изложена доступным языком, что является результатом моего многолетнего преподавания. Она будет идеальным учебником для политехнических курсов по силовой и промышленной электронике на начальном уровне. Эта книга будет также полезна для студентов.

Книга состоит из двенадцати глав. В первой главе описаны различные типы полупроводниковых приборов для применения в области силовой электроники, последовательная и параллельная работа кремниевых управляемых выпрямителей. В главах 2 и 3 рассматриваются различные цепи управления тиристорами и коммутационные процессы в различных силовых цепях. В главе 4 анализируются различные схемы выпрямителей с фазовым управлением, а в главе 5 рассматриваются ключевые схемы для преобразования постоянного тока. В главах 6 и 7 описаны различные типы инверторов и многофазных преобразователей. В главе 8 приведены схемы коммутации цепей переменного тока. В главе 9 обсуждаются различные прикладные применения полупроводниковых силовых приборов, например для быстродействующих регулирующих устройств постоянного и переменного тока, таких как нагреватели, источники тока для сварки, источники бесперебойного питания, импульсные источники питания и высоковольтные преобразователи постоянного тока. В главе 10 анализируются резонансные инверторы с  $R$ - и  $LR$ -нагрузкой. Принцип работы квазирезонансных преобразователей описываются в главе 11. В главе 12 анализируются микропроцессорные управляющие схемы для трехфазного преобразователя. В конце каждой главы приведены краткие вопросы по содержанию главы и ответы на основные вопросы.

В приложении 1 содержатся сведения по основным лабораторным работам в области силовой электроники, а контрольные вопросы и ответы даются в приложении 2.

Хотелось бы выразить благодарность доктору Б. Иланго и доктору Р. Рамамурти, которые преподавали мне этот предмет.

Автор также выражает глубокую благодарность г-ну Т. Р. Пачимуту, доктору Т. П. Ганесану и профессору В. Сабраманяму, Техническому колледжу Исвари, Чинай, за проявленный интерес к изданию этой книги.

Автор хотел бы поблагодарить г-на Н. Джайрамана и г-на Н. А. Аббу за подготовку иллюстраций и г-на Т. Раджасикара за печатание рукописи. Также выражаю благодарность издательскому дому «Нароса» за издание этой книги.

Я был бы рад получить замечания и предложения для улучшения этой книги.

*С. Рама Реди*

## ГЛАВА 1

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

### 1.1. Введение

В этой главе рассматриваются модели полупроводников, различные полупроводниковые приборы и способы защиты тиристоров.

#### 1.1.1. Собственный полупроводник

Собственный полупроводник — это чистый беспримесный монокристаллический материал. Кремний и германий являются полупроводниковыми материалами. Для формирования устойчивой ковалентной связи необходимо иметь восемь электронов в валентной зоне. Атом кремния имеет четыре валентных электрона, участвующих в ковалентных связях с четырьмя соседними атомами. Символическое изображение ковалентной связи показано на рис. 1.1а.

При температуре абсолютного нуля в полупроводниковом кристалле отсутствует тепловое возбуждение носителей. Все электроны участвуют в формировании ковалентных связей, свободные электроны отсутствуют.

Следовательно, проводимость отсутствует. Таким образом, полупроводник является изолятором при 0 К.

Схематическое представление зонной структуры при этих условиях показано на рис. 1.1б. Зона проводимости не заполнена, поскольку электроны проводимости отсутствуют.

При конечной температуре в полупроводнике происходит процесс теплового возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости. Этот процесс уравнивается рекомбинацией электронов из зоны проводимости и дырок из валентной зоны. В собственном



полупроводнике число возбужденных электронов в зоне проводимости точно равно числу дырок, оставшихся в валентной зоне. Отсюда видно, что в собственном полупроводнике уровень Ферми лежит в середине запрещенной зоны, как показано на рис. 1.1в.

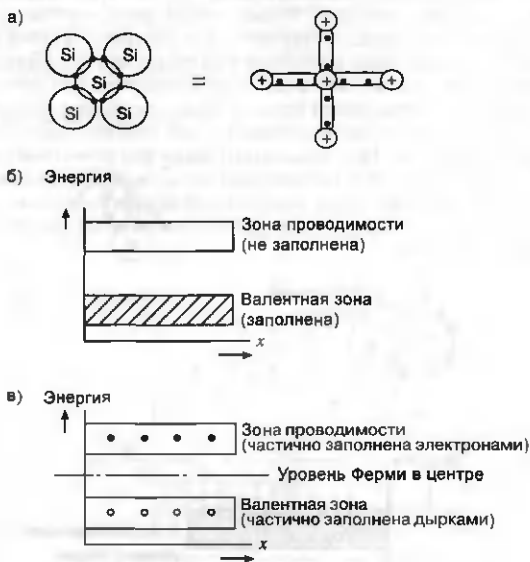


Рис. 1.1. а) Ковалентная связь;  
б) Схематическое представление зонной структуры при 0 К;  
в) Схематическое представление зонной структуры при комнатной температуре

### 1.1.2. Примесный полупроводник

Примесный полупроводник также называется легированным полупроводником. В зависимости от примеси полупроводник может быть *n*-типа и *p*-типа. Буква «*n*» обозначает электронную проводимость, а «*p*» — дырочную.

### Электронный тип, или *n*-тип

Если чистый полупроводник легировать пятивалентной примесью, получится полупроводник электронного типа. Пятивалентными примесями являются сурьма, мышьяк и висмут. Пятивалентный атом имеет пять валентных электронов. Однако четыре электрона этого атома являются общими с соседними атомами. Следовательно, каждый атом примеси поставяет один свободный электрон в зону проводимости. Количество атомов примеси определяет концентрацию свободных электронов. Поскольку атомы примеси отдают свободные электроны, они называются донорами. Энергетическая зона такого полупроводника показана на рис. 1.26. Часть ковалентных связей при комнатной температуре разрушаются вследствие тепловых флуктуаций, в результате чего в валентной зоне образуются дополнительные дырки. Большая часть носителей заряда в полупроводнике в этом случае является электронами, а меньшая — дырками.

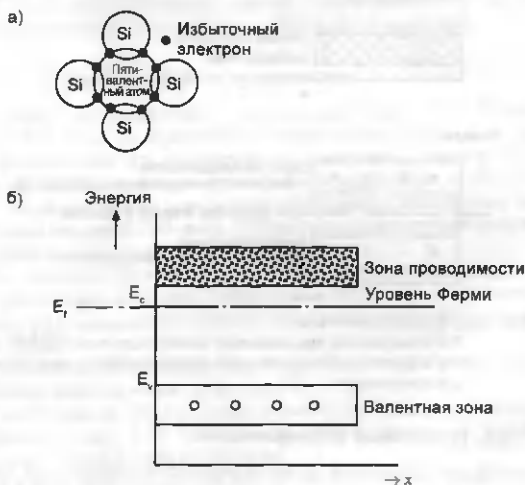


Рис. 1.2. а) Полупроводник *n*-типа;

б) Зонная структура

$E_c$  — самый низкий энергетический уровень в области проводимости, а  $E_v$  — самый высокий энергетический уровень в валентной зоне.  $E_f$  — энергетический уровень Ферми. В полупроводнике, содержащем примесные атомы, уровень Ферми смещается от середины запрещенной зоны настолько, насколько это необходимо, чтобы обеспечить выполнение условия электронейтральности образца. Следовательно, в полупроводнике  $n$ -типа уровень Ферми находится ближе к зоне проводимости, так как большинство проводящих носителей — электроны.

### Дырочный тип, или $p$ -тип

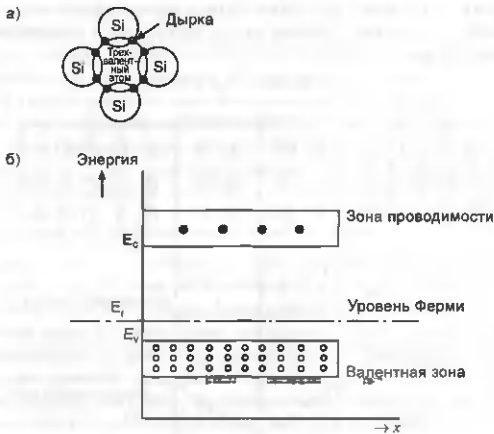


Рис 1.3. а) Полупроводник  $p$ -типа;  
б) Зонная структура

Если собственный полупроводник легировать трехвалентной примесью, получится полупроводник дырочного типа, как показано на рис. 1.3. Трехвалентными примесями являются индий, галлий, бор и алюминий. Трехвалентный атом имеет три валентных электрона, а для формирования устойчивой ковалентной связи необходимо иметь восемь электронов в валентной зоне. Следовательно, в этом случае из-за отсутствия в примесном атоме четвертого электрона образуется вакансия. Этот отсутствующий электрон называется «дырка». Дырки в полупроводнике

имеют положительный заряд. Большая часть носителей заряда в полупроводнике в этом случае является дырками, а меньшая — электронами. Следовательно, в полупроводнике  $p$ -типа уровень Ферми находится ближе к валентной зоне, так как большинство проводящих носителей — дырки.

### 1.1.3. $p$ - $n$ -переход

Как показано на рис. 1.4,  $p$ - $n$ -переход формируется в полупроводниковом кристалле путем создания двух соседних легированных областей с проводимостью  $p$ -типа и проводимостью  $n$ -типа. Дырки в полупроводнике  $p$ -типа обозначены знаком «+», а электроны в полупроводнике  $n$ -типа знаком «-».

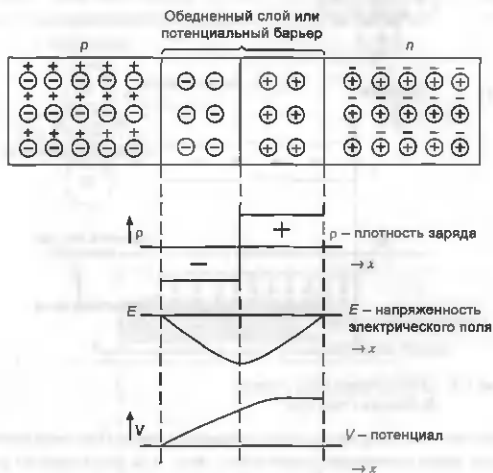


Рис. 1.4.  $p$ - $n$ -переход

В сформированном  $p$ - $n$ -переходе часть электронов из зоны проводимости легированной области  $n$ -типа проникают в область  $p$ -типа, а часть дырок из валентной зоны легированной области  $p$ -типа проникают в  $n$ -область. В этой переходной области заряды электронов и дырок

взаимно компенсируются, образуется обедненная носителями заряда область. Этот процесс называется рекомбинацией. Среднее время рекомбинации называется временем жизни электронно-дырочных пар. В обедненной области, по существу, формируется сам *p-n*-переход. Процесс рекомбинации через некоторое время прекращается. Электроны из зоны проводимости *n*-области отталкиваются отрицательно заряженными ионами *p*-области. Дырки из валентной зоны *p*-области отталкиваются положительно заряженными ионами *n*-области. Этот процесс блокирует дальнейшую рекомбинацию.

На графике (рис. 1.4) слева от потенциального барьера приведена плотность отрицательного заряда, а справа — плотность положительного заряда.

Напряженность электрического поля максимальна в центре обедненной области и уменьшается до нуля по обе стороны обедненной области. Разность потенциалов между *p*- и *n*-областями пропорциональна работе, затраченной на перемещение элементарного положительного заряда слева направо через обедненную область. Затраченная работа увеличивается по мере перемещения заряда направо через обедненную область, соответственно увеличивается разность потенциалов.

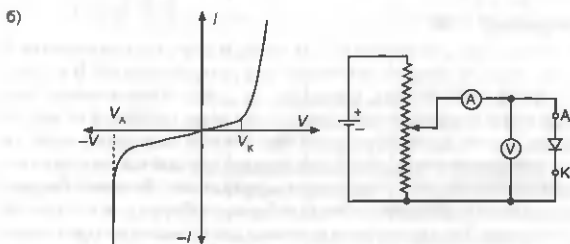
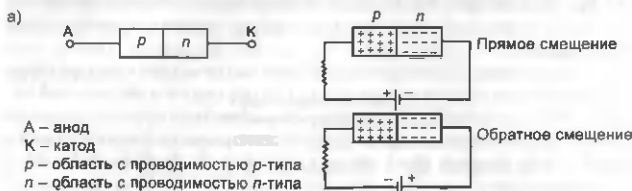
### Обедненный слой

В сформированном *p-n*-переходе электроны и дырки перемещаются к центру обедненной области, в которой они рекомбинируют. В *p-n*-переходе формируется область, свободная от заряда. Положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные ионы находятся на малом расстоянии друг от друга. Образуется заряженный дипольный слой, то есть на *p-n*-переходе из-за разделения зарядов появляется напряжение. Это напряжение называется барьерным напряжением. Величина барьерного напряжения определяется разностью уровней Ферми *p*- и *n*-областей полупроводника. Его характерная величина для германиевого *p-n*-перехода 0,3 В, а для кремниевого *p-n*-перехода 0,7 В.

## 1.2. *p-n*-диод

Диод представляет собой пассивный нелинейный элемент с двумя выводами, как показано на рис. 1.5а. Сам диод сформирован между *p*- и *n*-областями полупроводника. У диода два электрода, которые называются «анод» и «катод». Когда положительная клемма источника напряжения подключена к аноду, а отрицательная — к катоду, диод смещен в прямом направлении. Электроны с отрицательной клеммы батареи протекают

в зоне проводимости  $n$ -области. В области перехода электроны рекомбинируют с дырками и переходят в валентную область. Далее они протекают в валентной зоне  $p$ -области по направлению к положительной клемме батареи. Этим объясняется проводимость диода со смещением в прямом направлении. На вольт-амперной характеристике диода, смещенного в прямом направлении, видно, что ток практически не протекает до тех пор, пока приложенное напряжение меньше, чем напряжение пятки ( $V_K$ ). Когда напряжение больше, чем  $V_K$ , ток, проходящий через диод, увеличивается с ростом приложенного напряжения, как показано на рис. 1.5б.



$V_K$  — напряжение пятки (0,3 В для германия и 0,7 В для кремния)

$V_A$  — напряжение лавинного пробоя

Рис. 1.5. а)  $p$ - $n$ -диод;

б) Вольт-амперные характеристики диода

Когда анод подключен к отрицательной клемме батареи, а катод к положительной клемме, диод смещен в обратном направлении. Через диод протекает небольшой ток утечки, связанный с тепловой генерацией дырок в  $n$ -области и электронов в  $p$ -области.

Когда обратное напряжение **возрастает** до уровня  $V_A$ , электрическое поле в обедненной области  $p$ - $n$ -перехода увеличивается настолько, что электрон в этом поле приобретает достаточную энергию для разрушения ковалентной связи. В этом случае разрушенная ковалентная связь **поставляет** в обедненную область дополнительный электрон. В свою очередь, эти два электрона способны выбить еще два, и так далее. Ток через **обратно смещенный диод резко возрастает**. Этот эффект называется лавинным пробоем. Если не ограничить протекающий обратный ток, диод может повредиться.

Диод может быть представлен как замкнутый ключ, когда он смещен в прямом направлении, и как разомкнутый ключ, когда он смещен в обратном направлении.

Высоочастотные маломощные диоды предназначены для работы при низких напряжениях и малых токах. Их характерная рассеиваемая мощность может быть до 1 Вт. Силовые диоды работают при высоких напряжениях и больших токах. Их характерные обратные напряжения составляют киловольты, а прямые токи — килоамперы. Частотные свойства маломощных диодов, как правило, лучше, чем у силовых диодов.

### 1.3. Биполярный транзистор

Транзистор — это полупроводниковый прибор, изготовленный в виде трехслойной полупроводниковой структуры, образующей два близко расположенных  $p$ - $n$ -перехода. Транзистор имеет три вывода, которые называются «эмиттер», «база» и «коллектор». Принцип работы транзистора можно объяснить с помощью рис. 1.6а. Эмиттерный переход смещен в прямом направлении, что обеспечивает инжекцию неосновных носителей в область базы. Коллекторный переход смещен в обратном направлении и обеспечивает сбор неосновных носителей, инжектированных эмиттерным переходом в область базы. Следует заметить, что область базы должна иметь достаточно малую толщину. В противном случае все инжектированные носители успеют рекомбинировать при прохождении через область базы. Допустим, что через эмиттерный переход протекают 100 % электронов. Если в области базы приблизительно 1 % инжектированных электронов рекомбинируют, то оставшиеся 99 % электронов пройдут через коллекторный переход. Таким образом, можно записать:

$$I_c = I_b + I_e.$$

В схеме включения транзистора с общей базой вывод базы используется как общий для входа и выхода. Коэффициент усиления по току в этом случае  $\alpha = I_c/I_e$ . Это значение приблизительно равно 1. В схеме включения транзистора с общим эмиттером вывод эмиттера используется как общий для входа и выхода. Коэффициент усиления по току в этом случае  $\alpha = I_c/I_b$ . Его характерное значение находится в интервале 10...250.

Выходную характеристику транзистора можно снять с помощью схемы показанной на рис. 1.6б. При заданном базовом токе можно снять зависимость выходного тока от напряжения. Точно так же можно снять семейство выходных характеристик при различных базовых токах. На рис. 1.6б можно заметить, что ток через коллекторный переход в области отсечки весьма незначителен. В области насыщения напряжение на транзисторе очень низкое — типичное значение 0,1...1 В. Это режим включенного состояния.

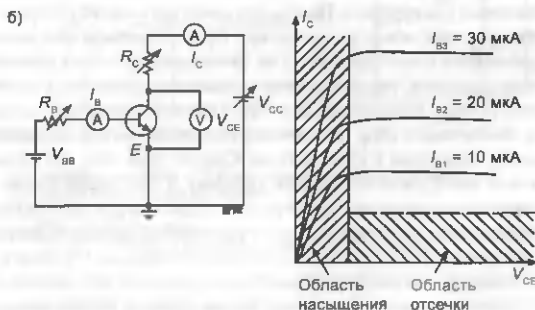
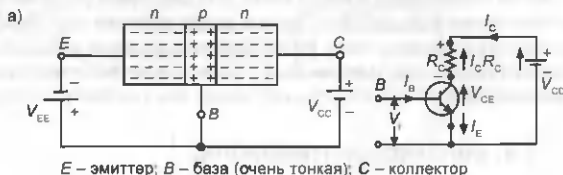


Рис. 1.6. а) Биполярный транзистор;

б) Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора



Транзистор является устройством, управляемым током. Если через базовый переход протекает ток, транзистор находится в проводящем состоянии, почти все приложенное внешнее напряжение падает на резисторе  $R_c$  и  $V_{ce}$  мвл.

Если через базовый переход ток отсутствует, транзистор не проводит и  $V_{ce} = V_{cc}$ . Таким образом, транзистор работает как управляемый ключ.

Когда транзистор насыщен, он работает как открытый ключ, а когда он находится в области отсечки, он работает как разомкнутый ключ.

Если на базу подать импульс тока, транзисторный ключ откроется. В отсутствие импульса тока на базе транзисторный ключ разомкнут. Знание принципа работы транзисторного ключа необходимо для глубокого изучения схем силовой электроники.

## 1.4. Тиристор

Тиристор — это четырехслойный прибор с тремя  $p$ - $n$ -переходами, а именно  $J_1, J_2, J_3$ . Когда тиристор включен в прямом направлении,  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  смещены в прямом направлении, то есть находятся в открытом состоянии. Переход  $J_2$  смещен в обратном направлении и находится в закрытом состоянии. Электрический ток от анода к катоду в этом случае не протекает. Структура и характеристики тиристора изображены на рис. 1.7.

Если напряжение на тиристоре увеличивается свыше  $V_{FB}$  (напряжение пробоя в прямом направлении), переход  $J_2$  из-за инжекции в него неосновных носителей переходит в прямое смещение. Тиристор переключается в режим проводимости. Напряжение на тиристоре падает до величины  $\approx 1$  В, а остальное приложенное напряжение падает на резисторе, включенном в анодную цепь.

Когда внод тиристора подключен к отрицательной клемме батареи, а катод к положительной,  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  смещены в обратном направлении, а  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  смещен в прямом направлении. В этом случае ток от катода к аноду не протекает. Тиристор ток не проводит. Эквивалентная схема тиристора при обратном смещении может быть представлена двумя последовательно включенными диодами. Следовательно, характеристика обратного смещенного тиристора похожа на характеристику обратного смещенного диода.

Процесс перехода тиристора из закрытого состояния в открытое называется включением. Процесс перехода тиристора из открытого состояния в закрытое называется выключением.

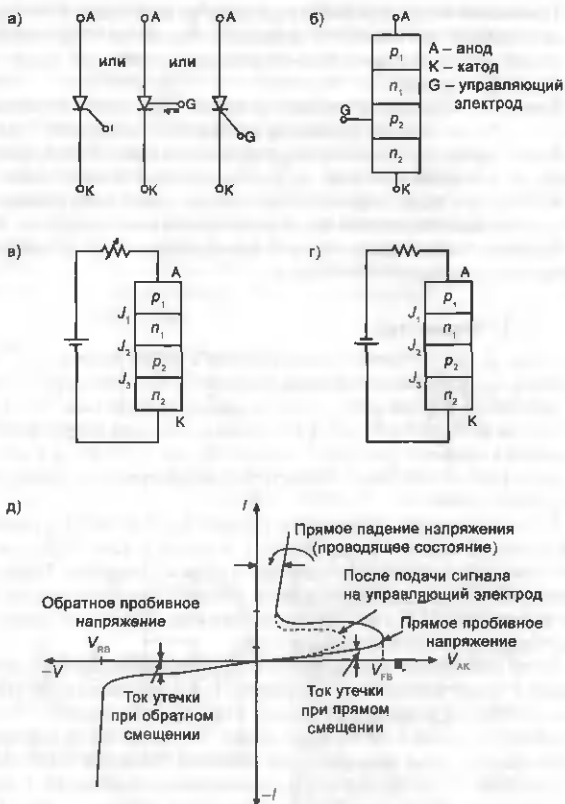


Рис. 1.7. а) Символическое обозначение тиристора;  
 б) Структура тиристора;  
 в) Схема прямого включения тиристора;  
 г) Схема обратного включения тиристора;  
 д) Вольт-амперные характеристики тиристора

### 1.4.1. Двухтранзисторный аналог тиристора

Двухтранзисторный аналог тиристора изображен на рис. 1.8а. Когда потенциал управляющего электрода положителен относительно катода,  $n$ - $p$ - $n$ -транзистор проводит, вследствие чего появляется ток в базовой области  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора. В свою очередь, коллекторный ток  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора создает ток в базовой области  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора. Даже если  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторы физически разделены, указанные выше токи будут протекать. Транзисторы переходят в насыщенное состояние. Следовательно, такая схема проводит ток, если к аноду приложено положительное напряжение. Если через управляющий электрод ток не протекает, между анодом и катодом закрытого тиристора может быть приложено большое прямое напряжение. В случае протекания тока через управляющий электрод на такую структуру достаточно подать небольшое напряжение для перевода её в проводящее состояние. Схема, изображенная на рис. 1.8б, является идеальным аналогом тиристора, для работы которой не требуется внешнее дополнительное питание. В ней два транзистора с различной проводимостью непосредственно подключены друг к другу.

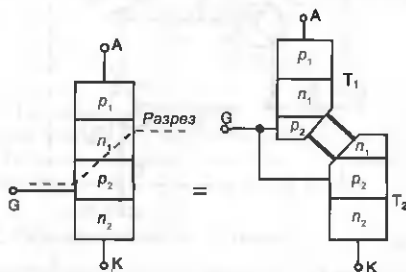


Рис. 1.8а. Двухтранзисторный аналог тиристора

Анодное напряжение, необходимое для перехода в проводящее состояние, является функцией тока управляющего электрода. Из характеристики видно, что чем больше значение тока управляющего электрода, тем меньше анодное напряжение требуется для перехода в проводящее состояние.

Для транзистора  $T_1$ :

$$I_{E1} = I_{CT} + I_{BT}$$



Из теоремы Кирхгофа следует:

$$I_A + I_G = I_K. \quad (1.4)$$

Подставив (1.4) в (1.3), получим:

$$(1 - \alpha_1) I_A = \alpha_2 (I_A + I_G); I_A(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = \alpha_2 I_G$$

Следовательно,  $I_A = \alpha_2 I_G [1 - (\alpha_1 - \alpha_2)]$ . Отсюда:

$$\frac{I_A}{I_G} = \frac{\alpha_2}{1 - (\alpha_1 - \alpha_2)}. \quad (1.5)$$

Если  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ , то  $I_A/I_G$  стремится к бесконечности. Практически значение  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  приблизительно равно 0,99.

Из уравнения (1.5) видно, что можно управлять большим анодным током тиристора за счет малого тока управляющего электрода, так как отношение  $I_A/I_G$  очень большое.

Допустим, кремниевый управляемый выпрямитель, показанный на рис. 1.7а, находится во включенном состоянии. Анодный ток тиристора может быть уменьшен за счет увеличения резистора в анодной цепи. Если ток, протекающий в анодной цепи тиристора, ниже определенной величины  $I_h$ , тиристор закрывается и далее остается в выключенном состоянии. Минимальный ток, ниже которого тиристор переходит в выключенное состояние, называется током удержания активного состояния. Типичное значение такого тока для тириستоров средней мощности  $\approx 20$  мА.

#### 1.4.2. Обратно смещенный тиристор

Когда на тиристор подано обратное напряжение, ток в цепи управляющего электрода недопустим. В этом случае  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  смещены в обратном направлении, а  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  смещен в прямом направлении. Если же через управляющий электрод протекает ток,  $p$ - $n$ -переход  $J_3$  смещен в прямом направлении. Следовательно, приложенное к тиристору напряжение полностью падает на  $p$ - $n$ -переходе  $J_1$ . Тогда вследствие лавинного пробоя  $p$ - $n$ -переход  $J_1$  начинает проводить ток. Тиристор переходит в проводящее состояние. Но обратно смещенный тиристор не должен находиться в проводящем состоянии, следовательно, в этом случае наличие тока в управляющем электроде недопустимо.

### 1.4.3. Различия между транзистором и тиристором

Транзистор работает как управляемый ключ. Он находится в проводящем состоянии до тех пор, пока через область базы протекает ток от внешнего источника. Напротив, через транзистор ток не протекает в отсутствие тока базы. В случае использования тиристора как управляемого ключа необходимо обеспечить от внешнего источника только импульс тока в цепи управляющего электрода, чтобы он перешел во включенное состояние. Запирается тиристор при уменьшении протекающего через него тока меньше порогового, то есть он является самозапирающимся устройством.

### 1.4.4. Определение параметров тиристора

#### Максимальное обратное напряжение

Определяется как максимальное обратное напряжение, при котором тиристор может работать длительное время.

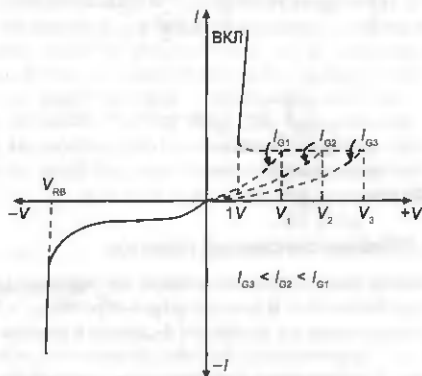


Рис. 1.9. Влияние тока управляющего электрода на характеристики тиристора ( $V_{RB}$  — обратное пробивное напряжение, ВКЛ — включенное состояние)

Максимальное обратное напряжение тиристора зависит от температуры.

### Падение напряжения на тиристоре во включенном состоянии

Когда тиристор переходит в проводящее состояние, напряжение на нем существенно уменьшается. Остаточное напряжение на тиристоре называется напряжением включенного состояния. Типичное значение остаточного напряжения находится в диапазоне приблизительно от 1 до 2 В.

### Скорость нарастания напряжения ( $dv/dt$ )

Параметр, обозначающий скорость нарастания напряжения в прямом направлении, при которой тиристор не переходит в проводящее состояние. Максимальная скорость нарастания напряжения без переключения тиристора называется критической скоростью нарастания напряжения. Как только скорость нарастания напряжения превышает критическое значение скорости нарастания напряжения, тиристор переходит в проводящее состояние. В обедненном слое  $p$ - $n$ -перехода  $J_2$  тиристора образуется конденсатор емкостью  $C$ . Тогда емкостной ток  $I_c$ , протекающий через  $p$ - $n$ -переход  $J_2$ , можно записать как  $I_c = C dv/dt$ , где  $dv/dt$  — значение скорости нарастания напряжения.

### Номинальный ток

Пропускная способность по току устройства известна как его номинальный ток. Номинальный ток может быть непрерывный и импульсный.

*Непрерывный ток.* Обычно определяется в терминах среднего или среднеквадратичного значения.

*Импульсный периодически повторяющийся ток.* Он определяется в терминах пикового значения. Если тиристорный управляемый выпрямитель периодически включать и выключать, то устройство будет повторять определенные нестационарные процессы. На пиковые значения токов при этих процессах следует обратить внимание.

*Однократный импульсный ток.* Ток при однократных импульсных воздействиях определяется в терминах пикового значения. Тиристор можно подвергнуть воздействию однократного импульсного тока только в течение времени, указанного для этого параметра. Однократный импульсный ток соответствует максимально возможному непериодическому пику тока, который тиристор способен выдержать. При однократном пиковом воздействии температура  $p$ - $n$ -перехода может кратковременно превысить допустимый уровень. Однако если величины этих воздействий меньше допустимых, устройство способно в дальнейшем восстановить

нормальную температуру. Этот процесс не повлечет за собой никаких необратимых изменений.

### Ток запуска

Ток запуска — это минимальный ток управляющего электрода, который переводит тиристор из выключенного состояния во включенное. Этот параметр также определяется как минимальный ток запуска. Его характерная величина  $\approx 1 \dots 100$  мА.

### Ток удержания тиристора

Минимальное значение электрического тока, требуемого для поддержания тиристора в состоянии проводимости, называется током удержания. Ток удержания может быть определен как минимальное значение электрического тока, ниже которого тиристор переходит в выключенное состояние. Величина этого тока очень мала (обычно измеряется в миллиамперах), она даже меньше, чем запирающий ток управляющего электрода.

### Ток управляющего электрода

Ток, подаваемый на управляющий электрод, называется током управляющего электрода. Он может быть минимальный и максимальный. Минимальный ток управляющего электрода — это минимальное значение тока, которое необходимо для включения тиристора. Управляющий ток меньше минимального не способен включить тиристор. Значение минимального тока зависит от скорости нарастания этого тока. С другой стороны, максимальный ток управляющего электрода — это максимальное допустимое значение тока, которое может протекать через управляющий электрод непрерывно.

### Мощность, рассеиваемая на управляющем электроде

Средняя рассеиваемая мощность на управляющем электроде, вызванная протекающим через него импульсным током, определяется как мощность, рассеиваемая на управляющем электроде.

### Время включения тиристора

После подачи тока на управляющий электрод тиристор не способен мгновенно перейти в режим проводимости. Для этого требуется определенное время. Таким образом, время, которое требуется тиристорам для достижения состояния полной проводимости, определяется как время включения тиристора.



### Время выключения тиристора

Для выключения тиристора к нему требуется приложить обратное напряжение. Однако после этого требуется некоторое время, чтобы устройство выключилось. Это время определяется как время выключения тиристора. Его обычное значение составляет  $\approx 20 \dots 100$  мкс.

### Скорость нарастания тока

Скорость нарастания тока тиристора определяется как коэффициент  $di/dt$ . Максимальный коэффициент  $di/dt$ , при котором прибор способен сохранять включенное состояние, называется его критической скоростью нарастания тока.

#### 1.4.5. Методы защиты схем на тиристорах

Для надежного функционирования электрических цепей с тиристорами особенно важна их защита. Основными методами защиты цепей являются защита от избыточного тока и защита от избыточного напряжения.

Защита от избыточного тока схемы по выходной цепи и избыточного напряжения по входной цепи (приведена на рис. 1.10а) обеспечивается с помощью плавких предохранителей. При превышении избыточного тока срабатывает плавкий предохранитель и разрывает выходную цепь. Для защиты от избыточного напряжения по входу используется тиратрон. Тиратрон является нелинейным резистором. Он обладает очень высоким сопротивлением при номинальном напряжении. Когда во входной цепи возникает скачок напряжения, тиратрон включается и переходит в состояние с низким сопротивлением, срабатывает плавкий предохранитель по входу. Превышение допустимого напряжения на трансформаторе, тиристоре и нагрузке не происходит.

Тиристоры также необходима защита от превышения  $dv/dt$  и  $di/dt$ . Защита от превышения  $di/dt$  осуществляется за счет включения мвлой индуктивности последовательно с тиристором. Защита от превышения  $dv/dt$  осуществляется с помощью демпфирующей последовательной  $R_d C_d$  цепи. На рис. 1.10б видно, что если тиристорный ключ замыкается без демпфирующей цепи вследствие переходного процесса, через тиристор могут протекать большие импульсные токи.

При наличии демпфирующей цепи импульсные токи протекают через емкость  $C_d$ , обладающую низким реактивным сопротивлением в течение нестационарного процесса. Последовательно сопротивление  $R_d$  ограничивает величину импульсного тока. Таким образом, демпфирующая цепь работает как ограничитель скорости нарастания напряжения  $dv/dt$  на тиристоре.

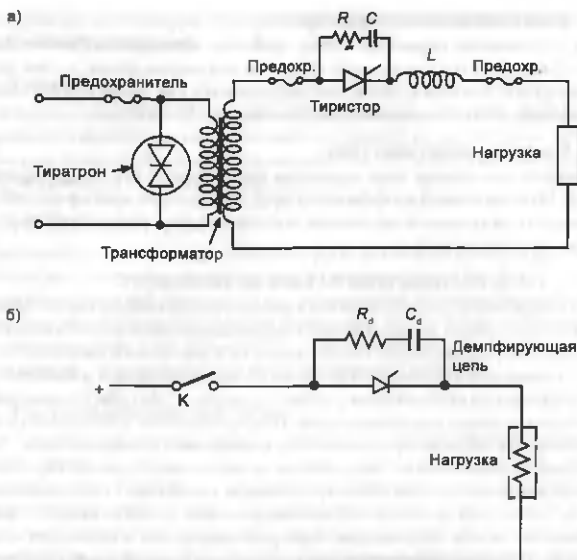


Рис. 1.10. а) Схема защиты с использованием тиристора;  
б) Тиристор с демпфирующей цепью

### 1.4.6. Защита нагрузки от бросков напряжения

Тиристор, подключенный параллельно источнику питания, как показано на рис. 1.11, называется шунтирующим тиристором. При нормальном режиме работы падение напряжения на резисторе  $R$  за счет протекающего через него тока недостаточно для срабатывания управляющей цепи тиристора. При превышении входного напряжения и увеличении номинального тока нагрузки падение напряжения на сопротивлении  $R$  становится достаточным для срабатывания управляющей цепи, тиристор включается. В результате срабатывает плавкий предохранитель. Таким образом, тиристор с управляющей цепью защищает нагрузку от избыточного тока при бросках напряжения во входной цепи.

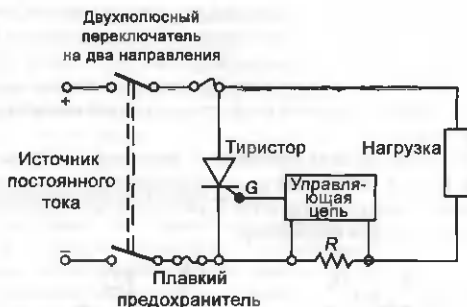


Рис. 1.11. Защита от бросков напряжения

### 1.4.7. Последовательная и параллельная работа тиристоров

В высоковольтных линиях электропередачи постоянного тока тиристоры используются для выпрямления. Рабочее напряжение в этом случае может достигать величин  $\approx 800$  кВ. Чтобы работать при таких напряжениях, необходимо использовать несколько последовательно соединенных тиристоров.

По характеристикам тиристоров, приведенным на рис. 1.12а, видно, что напряжения на них не равны при равных протекающих токах. Напряжения на тиристорах можно уравнивать за счет параллельно подключенных резисторов к каждому тиристор. При таком включении могут работать несколько тиристоров в цепи с напряжением, превышающим рабочее напряжение каждого тиристора. Величина параллельно подключенных резисторов должна быть выбрана как можно большей.

Для питания печей, мощных двигателей переменного и постоянного тока необходимы очень большие токи. Управлять большими токами можно, соединив два тиристора параллельно. Принцип параллельной работы тиристоров изображен на рис. 1.12б. По характеристикам тиристоров, приведенным на рис. 1.12а, видно, что токи в параллельно соединенных тиристорах не равны. Уравнять эти токи можно с помощью катушки индуктивности  $L$  с центральным отводом. Если ток тиристора  $T_1$  увеличивается, электромагнитная связь между двумя

половинами катушки индуктивности  $L$  стремится уменьшить ток через тиристор  $T_1$  и увеличить ток через тиристор  $T_2$ . Таким образом катушка индуктивности  $L$  с центральным отводом уравнивает токи в тиристорах. Параллельное включение большого количества тириستоров не получило распространения из-за трудностей применения катушек индуктивности.

Если время включения тиристора  $T_1$  меньше времени включения тиристора  $T_2$ , то  $T_1$  включается первым, напряжение на нем падает до  $\approx 1$  В, следовательно, позже тиристор  $T_2$  уже не сможет включиться из-за недостаточного на нем напряжения.

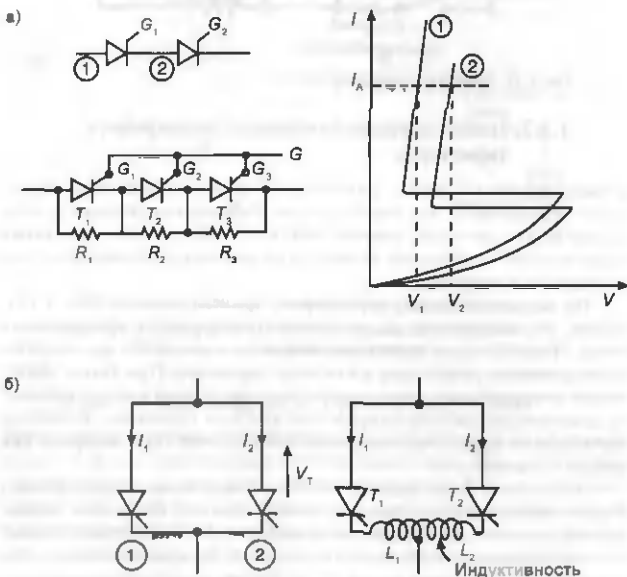


Рис. 1.12. Последовательное и параллельное соединение тиристоров:

а) Последовательное соединение;

б) Параллельное соединение

### 1.4.8. Способы включения тириستоров

Возможные способы включения:

- а) увеличение прямого напряжения;
- б) включение по управляющему электроду;
- в) включение по  $dv/dt$ ;
- г) включение светом;
- д) включение теплом.

#### Увеличение прямого напряжения

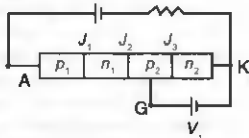
Если тиристор включен в прямом направлении,  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  находятся в проводящем состоянии, а  $J_2$  смещен в обратном направлении. Когда приложенное напряжение увеличивается до пробивного уровня, за счет лавинного пробоя переход  $J_2$  начинает проводить ток и тиристор переходит во включенное состояние.

Этот способ обычно не используется при больших рабочих напряжениях.

#### Включение по управляющему электроду

Пользуясь двухтранзисторным аналогом тиристора, следует заметить, что его включение может быть достигнуто за счет импульсного воздействия сигнала на управляющий электрод. В цепи управляющего электрода  $G$  источник  $V_1$  смещает  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  в проводящее состояние. Оба транзистора проводят, и тиристор работает как замкнутый ключ.

Этот метод включения тиристора используется наиболее широко.



#### Включение по $dv/dt$

Если тиристор смещен в прямом направлении,  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  находятся в прямом смещении, а переход  $J_2$  смещен в обратном направлении. Обедненная область  $p$ - $n$ -перехода  $J_2$  работает как диэлектрический слой.  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  являются проводящими обкладками этого диэлектрического слоя, то есть тиристор теперь функционирует как конденсатор. При подаче на тиристор резкого перепада напряжения в прямом направлении значение  $dv/dt$  велико. Через  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  начинает протекать емкостной ток, он переходит в проводящее состояние, и тиристор включается. Этот способ включения тиристора менее распространен, так как большой емкостной ток может повредить прибор.

### Включение светом

В результате воздействия источника света на тиристорную структуру поставляется энергия, необходимая для разрушения ковалентных связей. После разрушения нескольких ковалентных связей этот процесс лавинообразно продолжается,  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  переходит в проводящее состояние, и тиристор включается.

В линиях электропередачи высокого напряжения на постоянном токе требуется обеспечение хорошей гальванической развязки между силовыми высоковольтными цепями электропитания и цепями управления. Это, по существу, достигается с помощью оптоуправляемых тириستоров (фототириستоров).

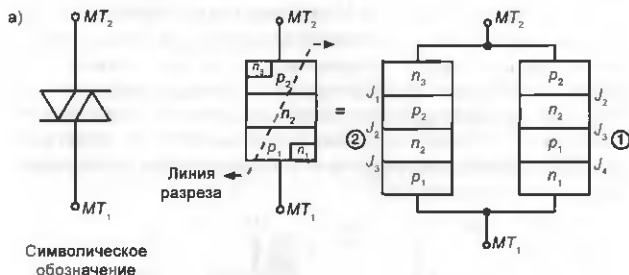
### Включение теплом

В результате воздействия тепла на тиристорную структуру поставляется энергия, необходимая для разрушения ковалентных связей. При этом область  $p$ - $n$ -перехода  $J_2$  нагревается за счет внешнего теплового источника, происходит образование дополнительных неосновных носителей,  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  переходит в проводящее состояние, и тиристор включается.

## 1.5. Динистор

Динистор — это пятислойный прибор с четырьмя  $p$ - $n$ -переходами. Структура динистора изображена на рис. 1.13а. Динистор является устройством, способным проводить ток в двух направлениях. Исходя из структуры динистора, его эквивалентная схема может быть представлена в виде двух  $p$ - $n$ - $p$ -приборов, соединенных навстречу друг другу. Когда потенциал электрода  $MT_2$  положителен относительно электрода  $MT_1$ , тиристор 1 смещен в прямом направлении,  $p$ - $n$ -переходы  $J_2$  и  $J_4$  смещены в прямом направлении, а  $J_3$  смещен в обратном направлении. Когда величина приложенного напряжения увеличивается,  $p$ - $n$ -переход  $J_3$  пробивается и тиристор 1 переходит из состояния высокого импеданса в состояние низкого импеданса. Характеристика этого тиристора подобна характеристике тиристора без управляющего электрода, смещенного в прямом направлении.

Когда потенциал электрода  $MT_1$  положителен относительно электрода  $MT_2$ , тиристор 2 смещен в прямом направлении,  $p$ - $n$ -переходы  $J_1$  и  $J_3$  смещены в прямом направлении, а  $J_2$  смещен в обратном направлении. Когда величина приложенного напряжения увеличивается,  $p$ - $n$ -переход  $J_2$  пробивается и тиристор 2 переходит из состояния высокого импеданса в состояние низкого импеданса. «Сшитая» вольт-амперная характеристика динистора показана на рис. 1.13б. Она симметрична относительно нуля координат. Динистор часто используется в цепи запуска симистора,



б)

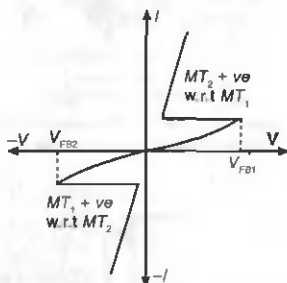


Рис. 1.13. а) Обозначение и эквивалентные схемы динистора;  
б) Вольт-амперные характеристики динистора

## 1.6. Симистор

Эквивалентная схема и характеристики симистора изображены на рис. 1.14а и 1.14б соответственно. Симистор имеет три электрода, а именно  $MT_1$ ,  $MT_2$  и управляющий электрод. Симистор является устройством, способным проводить ток в двух направлениях. Симистор эквивалентен двум тиристорам, соединенным навстречу друг другу, которые имеют общий управляющий электрод. Когда потенциал электрода  $MT_2$  выше  $MT_1$ , тиристор 1 находится в прямом включении и может быть переведен в проводящее состояние воздействием на управляющий электрод.

Когда потенциал электрода  $MT_1$  положителен по отношению к  $MT_2$ , тиристор 2 смещен в прямом направлении и также может быть переведен в проводящее состояние воздействием на управляющий электрод. Таким образом, симистор способен проводить ток в обоих направлениях. Для включения тиристора требуется воздействие положительного управляющего тока по отношению к катоду. Напротив, симистор может быть переведен в проводящее состояние как положительным управляющим током, так и отрицательным.

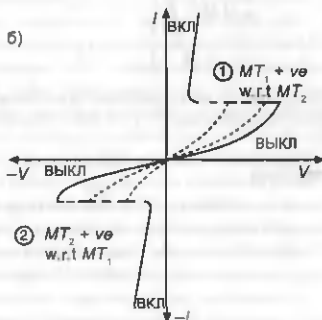
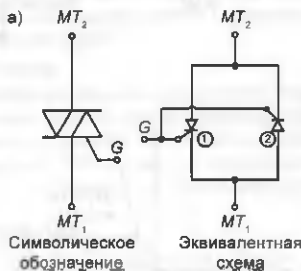


Рис. 1.14. а) Обозначение и эквивалентная схема симистора;

б) Вольт-амперные характеристики симистора



## 1.7. МОП-транзистор

Символическое обозначение и структура полевого транзистора (металл — окисел — полупроводник) с изолированным затвором (МОП-транзистора) приведены на рис. 1.15а. МОП-транзистор имеет три вывода, а именно исток, сток и затвор. Величина тока, протекающего между истоком и стоком, управляется путем изменения потенциала на затворе. Область затвора изолирована от сформированных в полупроводнике областей истока и стока тонким окисным слоем.

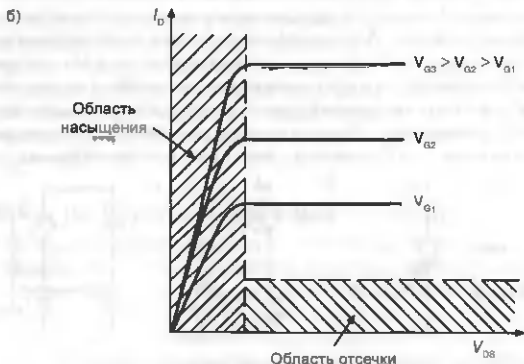
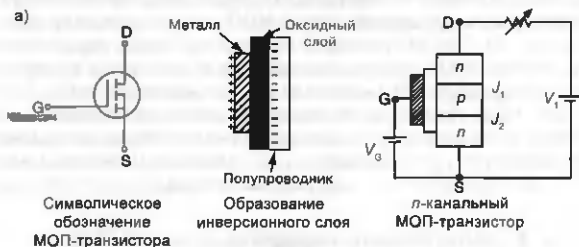


Рис. 1.15. а) Символическое обозначение и структура МОП-транзистора (S — исток; G — затвор; D — сток);  
б) Вольт-амперные характеристики МОП-транзистора

Затвор представляет собой одну обкладку конденсатора, поверхность полупроводника другую, а оксидный слой выполняет функцию диэлектрика. Когда источник  $V_G$  подсоединен к затвору, на затворе появляется положительный заряд, следовательно, в  $p$ -области полупроводника появляется приповерхностный отрицательный заряд, образуется инверсионный слой. Зона проводимости  $p$ -области заполняется электронами, и между  $n$ -областями полупроводника появляется проводящий канал. То есть при положительном напряжении на затворе  $n$ -канальный МОП-транзистор начинает протекать ток от истока к стоку. При нулевом или отрицательном напряжении на затворе МОП-транзистор ток не проводит. Таким образом, МОП-транзистор является прибором, управляемым напряжением. МОП-транзисторы широко используются в качестве высокочастотных силовых ключей на частотах вплоть до 1 МГц.

Если МОП-транзистор начинает проводить при положительном напряжении на затворе, то он работает в режиме обогащения канала. Из характеристик, приведенных на рис. 1.15б, видно, что ток в канале увеличивается с увеличением напряжения затвора.

## 1.8. Запираемый тиристор

Тиристор, описанный выше, не может быть выключен по цепи управляющего электрода. Запираемый тиристор возможно выключить, используя управляющий электрод. Двухнаправленная стрелка на символическом обозначении запираемого тиристора, как показано на рис. 1.16а, указывает, что ток управляющего электрода может протекать в обоих направлениях. Чтобы выключить запираемый тиристор, требуется ток затвора силой примерно  $1/5$  анодного тока. Время включения и выключения запираемого тиристора меньше, чем у тиристора с аналогичными параметрами.

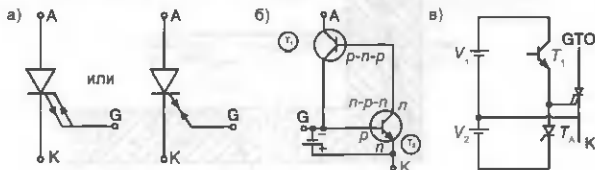


Рис. 1.16. а) Символическое обозначение запираемого тиристора;  
б) Эквивалентная схема (А — анод; К — катод;  
Г — управляющий электрод);  
в) Схема включения-выключения запираемого тиристора



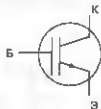
Когда между затвором и катодом тиристора, как показано на рис. 1.16б, прикладывается отрицательное напряжение, излишний заряд базовой области в  $n-p-n$ -транзисторе стекает на катод. Коллекторный ток транзистора  $T_2$  уменьшается. Следовательно, уменьшается базовый ток транзистора  $T_1$  и вместе с ним его коллекторный ток. Этот процесс способствует дальнейшему уменьшению тока базы  $T_2$ , оба транзистора выключаются.

Цепь включения-выключения запираемого тиристора изображена на рис. 1.16в. Когда транзистор  $T_1$  включен, источник  $V_1$  подключается между управляющим электродом и катодом. Через управляющий электрод начинает протекать положительный ток, и тиристор включается.

Чтобы выключить запираемый тиристор, требуется включить вспомогательный тиристор  $T_A$ . Источник  $V_2$  подключается между управляющим электродом и катодом. Через управляющий электрод начинает протекать отрицательный ток по отношению к катоду, тиристор выключается. Характеристика запираемого тиристора аналогична характеристике незапираемого тиристора.

## 1.9. Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ)

Биполярный транзистор с изолированным затвором представляет собой комбинацию биполярного транзистора и МОП-транзистора. Это устройство обладает высоким входным импедансом и способно столь же быстро переключаться, как и МОП-транзистор. Устройство обладает такой же высокой коммутируемой мощностью, как и биполярный транзистор.



## 1.10. Программируемый тиристор

Структура программируемого тиристора, показанного на рис. 1.17, ничем не отличается от структуры обычного тиристора. Отличие состоит в том, что управляющий электрод программируемого тиристора подключен к области  $n_1$ , а не  $p_2$ , как в обычном тиристоре. Такой управляющий электрод называется анодным управляющим электродом. Напряжение, задаваемое на анодном управляющем электроде, задает порог включения по напряжению программируемого тиристора. Основные характеристики программируемого тиристора аналогичны характеристикам обычного тиристора. Его максимальное рабочее напряжение  $\approx 200$  В при токе  $\approx 1$  А.

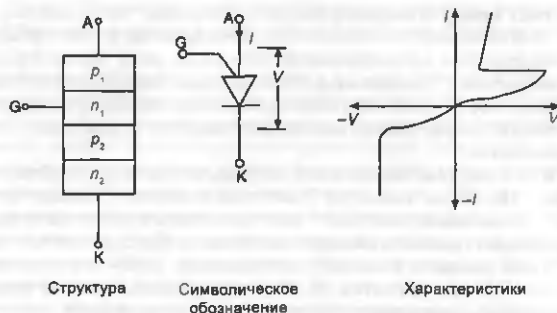


Рис. 1.17. Программируемый тиристор (А — анод; К — катод; G — управляющий электрод)

### 1.11. Тетродный тиристор

Тетродный тиристор — это четырехслойный прибор с двумя управляющими электродами, включенными в анодную и катодную цепи. Этот прибор похож на вакуумный тетрод. Основные характеристики тетродного тиристора аналогичны характеристикам обычного или программируемого тиристора.

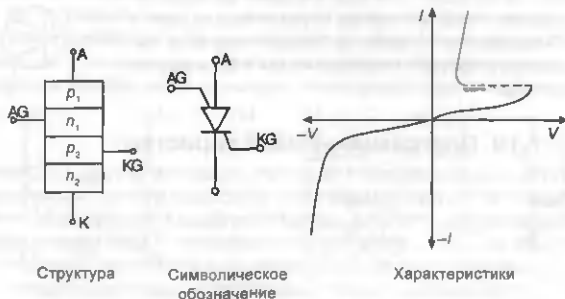


Рис. 1.18. Тетродный тиристор (А — анод; К — катод; AG — анодный управляющий электрод; KG — катодный управляющий электрод)

Тетродный тиристор может быть включен любым управляющим электродом. Смещение анодного управляющего электрода обратным управляющим током может использоваться для выключения прибора. Характерная величина этого тока составляет  $\approx 200$  мА при напряжении  $\approx 100$  В. Тетродный тиристор применяется для устройств синхронизации, логических цепей и цепей запуска.

## 1.12. Пороговый тиристор

Пороговый тиристор похож на программируемый тиристор. Отличие состоит в том, что в пороговом тиристоре между анодным управляющим электродом и катодом включен низковольтный лавинный диод  $D$ , как изображено на рис. 1.19. Благодаря наличию диода, пороговый тиристор включается при напряжении пробоя лавинного диода  $D$ , в отличие от тиристора, напряжение и ток включения которого существенно зависят от изменения температуры окружающей среды. Пороговый тиристор используется главным образом для устройств синхронизации, логических и запускающих цепей. Его рабочие токи составляют  $\approx 0,5$  А при напряжении  $\approx 20$  В.

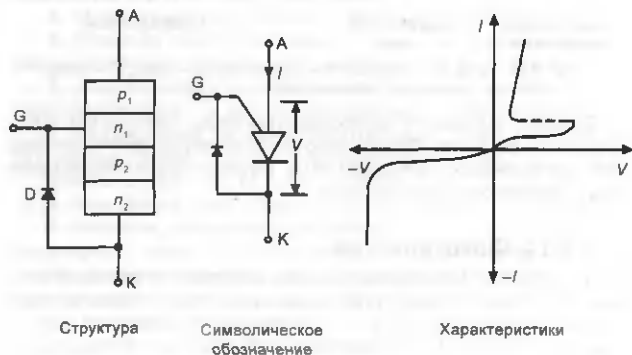


Рис. 1.19. Пороговый тиристор (А — анод; К — катод, G — анодный управляющий электрод; D — лавинный диод)

### 1.13. Тиристор с обратной проводимостью

В коммутационных цепях прерывания и цепях преобразователей параллельно тиристоры подключается обратно смещенный диод, как показано на рис. 1.20. Этот диод называется возвратным диодом. Тиристор с обратной проводимостью представляет собой устройство, в котором объединены тиристор и такой диод. Прямая характеристика тиристора с обратной проводимостью такая же, как и у тиристора. При обратном смещении внутренний диод переходит в проводящее состояние, поэтому обратная характеристика тиристора с обратной проводимостью такая же, как и прямая характеристика диода.

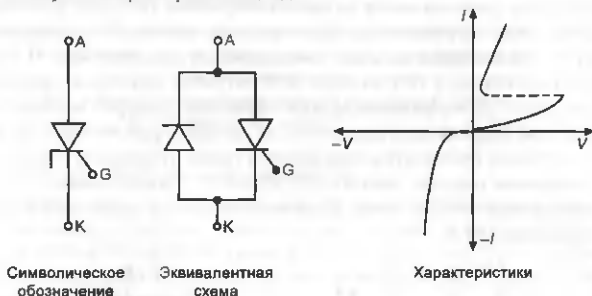


Рис. 1.20. Тиристор с обратной проводимостью (А — анод; К — катод; G — управляющий электрод)

Тиристор с обратной проводимостью также известен как асимметричный тиристор. Прямое рабочее напряжение такого прибора  $\approx 200 \dots 400$  В при рабочих токах до 500 А. Типовое обратное напряжение такого прибора составляет 30...40 В.

### 1.14. Фототиристор

В этом тиристоре управляющий электрод активируется световым потоком. Это позволяет обеспечить изоляцию между силовой и управляющей цепями, как показано на рис. 1.21. Управляющая цепь формирует импульс тока через светодиода. Излучаемый светодиодом световой поток попадает на центральный  $p-n$ -переход тиристора, и тиристор включается. Фототиристоры применяются в системах управления высоковольтных линий электропередачи высокого напряжения на постоянном токе.

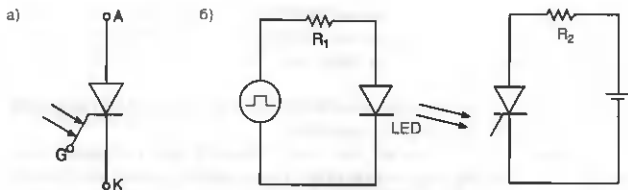


Рис. 1.21. Фототристор:

- а) символическое обозначение;  
б) схема включения

## Вопросы и ответы

1. Уменьшается ли напряжение включения тиристора с увеличением тока управляющего электрода?

2. Каково соотношение между управляющим напряжением  $V_{bb}$  и напряжением включения  $V_p$  в программируемом тиристоре?

Ответ. Коэффициент для данного прибора:  $\eta = V_p/V_{bb} = V_{EБ2}/V_{ВВ}$ .

3. Обеспечивают ли соединенные параллельно тиристоры общий номинальный ток меньший, чем сумма номинальных токов этих тиристоров?

4. Может ли скорость переключения тиристора быть менее 25 мкс?

5. Может ли избыточная скорость нарастания напряжения на тиристоре  $dv/dt$  быть причиной его самопроизвольного включения?

6. Должны ли прямое и обратное напряжения быть равными на всех тиристорах в случае последовательного соединения тиристоров?

7. Коллекторный ток транзистора составляет 2,9 мА. Если при этом базовый ток 100 мкА, то каков коэффициент передачи  $\alpha$ ?

Ответ.  $\alpha = I_c/I_e = I_c/(I_c + I_b) = 2,9/3 = 0,97$ .

8. Является ли полевой транзистор твердотельным прибором?

9. Может ли запираемый тиристор быть выключен с помощью большого отрицательного тока, приложенного к управляющему электроду?

10. Зависит ли время выключения тиристора от температуры и величины прямого тока?

11. Что такое  $p$ - $n$ -переход?

Ответ.  $P$ - $n$ -переход можно сформировать в чистом полупроводнике, легируя его примесями третьей и пятой группы.  $P$ - $n$ -переход имеет низкое падение напряжения при протекании тока в прямом направлении и малый обратный ток при обратном смещении.

12. Какие устройства относятся к классу тиристоров?

*Ответ.* Динистор, симистор, запираемый тиристор, программируемый тиристор, пороговый тиристор, тиристор с обратной проводимостью, фототиристор.

13. Что происходит при подаче отрицательного тока на управляющий электрод стандартного тиристора?

*Ответ.* Отрицательный ток, протекающий через управляющий электрод, не может перевести тиристор в выключенное состояние. Отрицательный ток управляющего электрода только приводит к дополнительному выделению тепла в  $p$ - $n$ -переходе управляющего электрода.

14. В чем отличие принудительного выключения тиристора от его выключения в цепи переменного тока?

*Ответ.* В цепи переменного тока при уменьшении тока до нуля тиристор выключается. В цепи постоянного тока тиристор выключается с помощью формирования нулевого тока реактивными  $LC$ -цепями.

15. Время обратного восстановления диода — это время рекомбинации носителей в  $p$ - $n$ -переходе. Да или нет?

16. Потери при переключении запираемого тиристора тем меньше, чем меньше количество включений и выключений в единицу времени?

17. Трансформатор применяют в цепи управляющего электрода тиристора для создания изоляции между цепью управления и силовой цепью?

18. Дiod обычно подключается к первичной обмотке импульсного трансформатора, чтобы демпфировать переходные процессы. Да или нет?

19. Однотранзисторный транзистор больше всего подходит для формирования коротких импульсов благодаря наличию области отрицательного сопротивления. Да или нет?

20. Ферритовый сердечник в импульсном трансформаторе должен работать без насыщения. Да или нет?

21. Наилучший сигнал управляющего электрода для поддержания тиристора в открытом состоянии — последовательность коротких импульсов?

22. Ток включения тиристора больше, чем ток удержания?

*Ответ.* Да.

23. Чем отличается ток включения тиристора от тока удержания?

*Ответ.* Ток включения — минимальный ток, требуемый для перехода тиристора в проводящее состояние. Ток удержания — минимальный ток, требуемый для поддержания тиристора во включенном состоянии.

24. Какой полупроводниковый прибор больше всего подходит для применения в высокочастотной силовой электронике?

*Ответ.* МОП-транзистор (диапазон рабочих частот до 1 МГц).



## ГЛАВА 2

# СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ

Электрическая цепь, которая создает положительный ток в цепи управляющего электрода тиристора, называется схемой управления тиристором. Основные схемы управления, применяемые для тиристора, следующие:

- 1) резистивная схема управления;
- 2) резистивно-емкостная схема управления;
- 3) схема управления с однопереходным транзистором;

Схемы управления на основе микропроцессоров обсуждаются в главе 12.

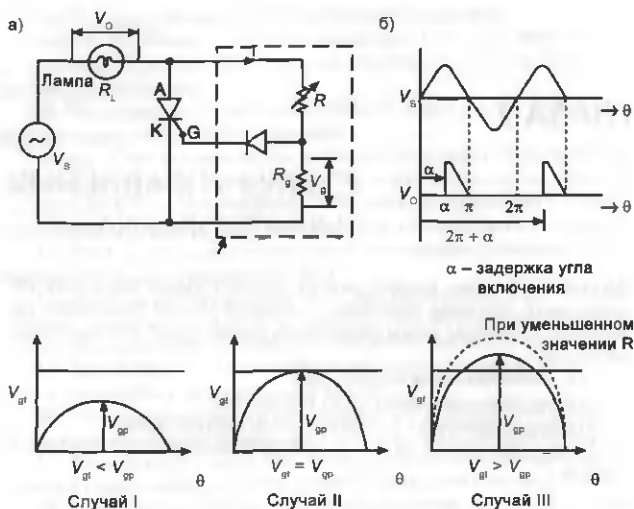
### 2.1. Резистивная схема управления

Схема однополупериодного выпрямителя с резистивной схемой управления приведена на рис. 2.1.

При положительном полупериоде напряжения на источнике  $V_s$  тиристор запускается с задержкой на угол  $\alpha$ . Тиристор находится в состоянии проводимости в диапазоне углов от  $\alpha$  до  $\pi$ . В течение отрицательного полупериода на тиристоре присутствует обратное напряжение, и он не проводит. В следующем положительном полупериоде тиристор запускается при значении угла  $(2\pi + \alpha)$ . Тиристор находится в состоянии проводимости при значении углов от  $(2\pi + \alpha)$  до  $3\pi$ . Положительное напряжение на нагрузке присутствует в моменты времени открытого состояния тиристора. Из схемы, показанной на рис. 2.1а, следует, что:

$$I = \frac{V_s}{R_L + R + R_g} \quad (2.1)$$

$$V_g = I R_g$$



$V_{гг}$  — минимальное напряжение включения на управляющем электроде  
 $V_{гп}$  — пиковое значение  $V_g$

Рис. 2.1. а) Тиристорная схема управления;  
 б) Форма сигнала

Ток через резистор  $R_g$  может изменяться при изменении резистора  $R$ . Если величина резистора  $R$  большая, напряжение  $V_g$  мало (случай I),  $V_{гг} < V_{гп}$ , и тиристор не может включиться. Если резистор  $R$  имеет величину такую, что  $V_{гг} = V_{гп}$  (случай II), тиристор включается при  $\alpha = 90^\circ$ . При дальнейшем уменьшении резистора  $R$  увеличивается  $V_g$  и уменьшается угол  $\alpha$ . Поэтому тиристор открывается раньше (случай III). Величина угла  $\alpha$  может регулироваться за счет изменения резистора  $R$ . Величина угла включения тиристора может изменяться в пределах от 0 до  $90^\circ$ . Диод пропускает на управляющий электрод только положительное напряжение. В течение отрицательного полупериода диод блокирует отрицательное напряжение на управляющем электроде.

## 2.2. Резистивно-емкостная схема управления

Резистивно-емкостная схема управления изображена на рис. 2.2а. Рассмотрим векторную диаграмму  $RC$ -цепи, изображенной на рис. 2.2б. Из рисунка видно, что емкостное напряжение **отстает** по фазе от напряжения питания на угол  $\theta_1$ . Значение угла  $\theta_1$  может регулироваться путем изменения резистора  $R$ . В течение положительного полупериода напряжения источника  $V_s$ , ток протекает через  $R$  и  $C$ . При  $\theta = \alpha$  значение  $V_C$  достигает значения  $V_{gr}$ , тиристор включается и находится во включенном состоянии в диапазоне углов от  $\alpha$  до  $\pi$ . При  $\theta = \pi$  тиристор выключается.

В течение отрицательного полупериода тиристор смещен в обратном направлении и ток не проводит. Емкостное напряжение отрицательное, и ток через диод не протекает.

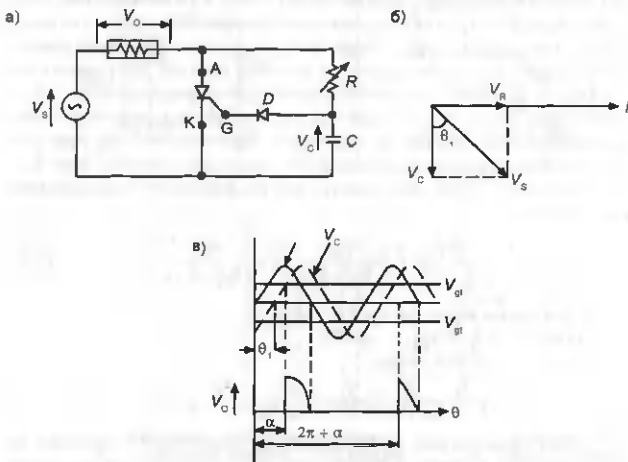


Рис. 2.2. а) Резистивно-емкостная схема управления;  
 б) Векторная диаграмма  $RC$ -цепи;  
 в) Форма напряжения на резистивной нагрузке

Величина угла включения тиристора может изменяться в зависимости от величины  $R$ . В  $RC$ -цепи величина угла включения зависит от произведения  $RC$ . Следовательно, угол включения тиристора может

регулироваться также за счет изменения  $C$ . При изменении только величины резистора  $R$  угол включения тиристора может варьироваться в диапазоне от 0 до  $90^\circ$ . При изменении величины емкости  $C$  угол включения может дополнительно варьироваться еще на  $90^\circ$ . Следовательно, полный диапазон управления углом включения тиристора лежит в пределах от 0 до  $180^\circ$ .

### 2.3. Схема управления с однопереходным транзистором

Структура однопереходного транзистора изображена на рис. 2.3а, а его символическое обозначение — на рис. 2.3б. Однопереходный транзистор имеет три электрода: эмиттер, база 1 и база 2. Эквивалентная схема однопереходного транзистора, показанная на рис. 2.3в, состоит из диода и двух резисторов  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$ . Общая точка резисторов называется межбазовой точкой. Если напряжение на эмиттере меньше, чем напряжение на межбазовой точке, однопереходный транзистор выключен. Если напряжение на эмиттере больше, чем напряжение на межбазовой точке, однопереходный транзистор включается, сопротивление  $R_{B1}$  при этом существенно уменьшается. Отношение напряжения на резисторе  $R_{B1}$  к напряжению питания определяется как коэффициент использования напряжения  $\eta$ .

$$\eta = \frac{V_{RB1}}{V_{BB}} = \frac{IR_{B1}}{I(R_{B1} + R_{B2})}; \quad \eta = \frac{R_{B1}}{(R_{B1} + R_{B2})}. \quad (2.2)$$

Характерная величина  $\eta \approx 0,6...0,7$ .

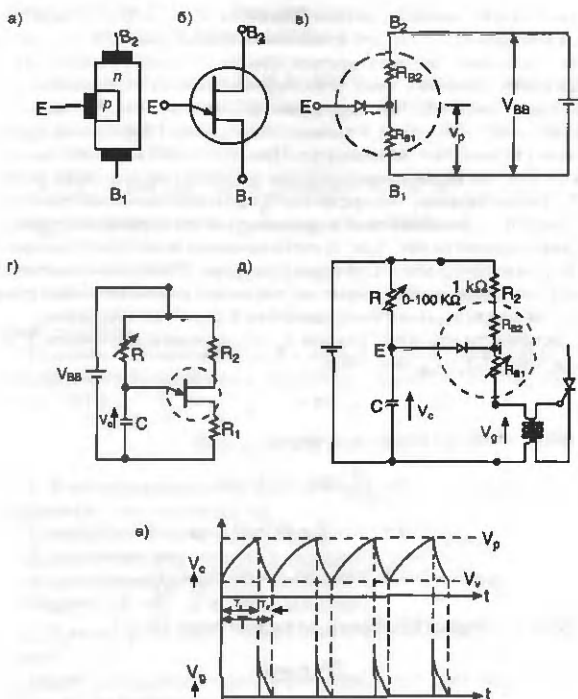
На рис. 2.3е  $V_C = V_{BB}(1 - e^{-t/RC})$ .

Если  $t = T_c$ ,  $V_C = V_p$ , тогда:

$$V_p = V_{BB}(1 - e^{-T_c/RC}); \quad V_p/V_{BB} = 1 - e^{-T_c/RC}.$$

Если батарея на рис. 2.3г подключена, конденсатор  $C$  начинает заряжаться через резистор  $R$ . Напряжение на эмиттере экспоненциально возрастает. При этом на межбазовой точке присутствует напряжение  $V_p$  (напряжение пика).

До тех пор пока напряжение на эмиттере меньше, чем напряжение пика  $V_p$ , диод ток не проводит. Когда напряжение на конденсаторе становится больше, чем  $V_p$ , диод смещается в прямом направлении и начинает проводить ток. Конденсатор разряжается через резистор  $R$ .



$V_p$  – напряжение пика (точка разряда)

$T_c$  – период заряда

$V_v$  – напряжение впадины (точка заряда)

$T_d$  – период разряда

Рис. 2.3. Схема управления с однопереходным транзистором;

а) Структура;

б) Символическое обозначение;

в) Эквивалентная схема;

г) Схема генератора;

д) Схема управления тиристором;

е) Формы напряжений на конденсаторе и управляющем электроде

При этом величина резистора  $R_1$  намного меньше величины резистора  $R$  и разряд конденсатора происходит намного быстрее, чем заряд. Когда напряжение на конденсаторе становится ниже напряжения  $V_f$  (напряжение впадины), диод перестает проводить ток, поскольку напряжение на эмиттере становится ниже напряжения пика. Конденсатор снова начинает заряжаться, и процесс повторяется. При этом ток заряда протекает только через конденсатор. При включении однопереходного транзистора ток разряда конденсатора протекает только через резистор  $R_1$ . Таким образом, через резистор  $R_1$  протекает последовательность импульсов тока, которая может использоваться для управления тиристором, как показано на рис. 2.3д. За счет изменения величины резистора  $R$  можно регулировать угол включения тиристора. Такая схема называется схемой релаксационного генератора, поскольку однопереходный транзистор большую часть времени находится в закрытом состоянии.

Пренебрегая временем разряда  $T_d$  по сравнению с временем  $T_c$  и с учетом, что  $\eta = V_p/V_{BB}$ , получаем:

$$e^{-T_c/RC} = 1 - \eta.$$

После логарифмирования получаем:

$$-\frac{T_c}{RC} \ln e = \ln(1 - \eta);$$

$$\ln e = 1; -T_c = RC \ln(1 - \eta);$$

$$T_c = -RC \ln(1 - \eta); T = RC \ln \frac{1}{(1 - \eta)}$$

Если  $T$  — период колебаний, то частота будет  $f = 1/T$ .

## Задачи

**Упр. 2.1.** Оцените минимальное и максимальное значения зарядного резистора в цепи эмиттера однопереходного транзистора для регулировки угла  $\alpha$  включения тиристора в пределах от  $20^\circ$  до  $160^\circ$  при частоте 50 Гц. При расчетах принять  $C = 0,1$  мкФ и  $\eta' = 0,7$ .

*Решение*

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ мс},$$

что соответствует углу  $\alpha = 360^\circ$ .

Следовательно,  $T/2 = 10$  мс соответствует углу  $\alpha = 180^\circ$ .

Если  $\alpha = 20^\circ$ , то  $T_1/10 = 20/180$  или  $T_1 = 1,11$  мс;

$$T_2/10 = 160/180,$$

$$T_2 = 8,88 \text{ мс.}$$

$$\text{Но } T_1 = R_1 C \ln \frac{1}{1-\eta'}.$$

$$1,11 \cdot 10^{-3} = R_1 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{1}{1-0,7} \text{ или } R_1 = 9,25 \text{ кОм.}$$

Если  $\alpha = 160^\circ$ , то  $T_2 = 160/180$  или  $T_2 = 8,88$  мс, то:

$$T_2 = R_2 C \ln \frac{1}{1-\eta'}$$

или  $R_2 = 74$  кОм.

Резистор  $R$  должен изменяться в пределах от 9,25 до 74 кОм чтобы регулировать угол включения тиристора в пределах от  $20$  до  $160^\circ$  при частоте 50 Гц.

## Вопросы и ответы

**1. Каковы максимальные диапазоны регулирования угла включения тиристора в случае применения:**

- 1) резистивной схемы управления;
- 2) резистивно-емкостной схемы управления;
- 3) схемы управления с однопереходным транзистором?

**Ответ.** 1)  $0-90^\circ$ , 2)  $0-180^\circ$ , 3)  $0-180^\circ$ .

**2. Какова функция диода в цепи управляющего электрода тиристора?**

**Ответ.** Диод обеспечивает включение тиристора только при положительном полупериоде.

**3. Каково преимущество схемы управления с однопереходным транзистором перед резистивно-емкостной схемой управления?**

**Ответ.** Схема управления с однопереходным транзистором обеспечивает изоляцию между цепью управления и цепью электропитания с помощью импульсного трансформатора.

**4. Почему резистивная схема управления тиристором не популярна?**

**Ответ.** Резистивная схема управления не популярна, так как фазовое управление возможно только в диапазоне от  $0$  до  $90^\circ$ .

## ГЛАВА 3

# ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ СХЕМЫ

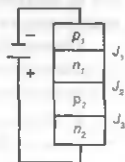
### 3.1. Введение

Если тиристор перешел в проводящее состояние, его нельзя быстро выключить за счет воздействия на управляющий электрод. Однако протекание тока через тиристор можно эффективно прервать некоторыми внешними воздействиями в цепи протекания тока. Процесс выключения тиристора называется переключением.

Генерацией управляющих импульсов приводятся в действие простые низковольтные схемы электропитания. Но переключающие схемы, предназначенные для работы с большими мощностями, более сложны. Следует заметить, что требуется больше энергии, чтобы выключить тиристор, чем включить его. Большинство проблем при разработке переключающих схем силовой электроники и их частых отказов может быть следствием использования форсированных режимов работы прибора.

### 3.2. Переключение

Чтобы выключить тиристор за минимальное время, необходимо приложить к нему обратное напряжение. Когда напряжение на аноде тиристора отрицательно по отношению к катоду, дырки  $p$ - $n$ -перехода  $J_1$  перемещаются по направлению к отрицательной клемме источника, а электроны  $p$ - $n$ -перехода  $J_2$  перемещаются по направлению к положительной клемме, как изображено на рис. 3.1а. В результате этого процесса во внешней цепи протекает небольшой обратный ток. После того как дырки и электроны из  $p$ - $n$ -переходов  $J_1$  и  $J_2$  удалены, тиристор переходит в закрытое состояние.





Чтобы понять принципы работы различных переключающих схем, необходимо прояснить основные принципы функционирования LC-цепи и контура ударного возбуждения, которые рассматриваются в последующих разделах.

### 3.3. Последовательная LC-цепь

Если конденсатор заряжается через индуктивность и элемент с однопроводимостью (диод), напряжение на нем удваивается к концу полупериода. Все элементы схемы считаются идеальными, а начальные условия — нулевыми.

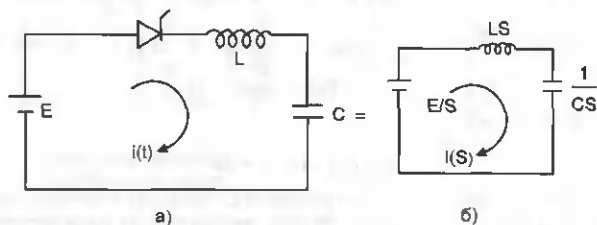


Рис. 3.1. Последовательная LC-цепь

Рассмотрим схему, изображенную рис. 3.1б. Ток в  $S$ -координатах может быть записан, исходя из закона Ома, как:

$$I(s) = \frac{E/S}{LS + 1/CS} = \frac{E/S}{(LCS^2 + 1)/CS} = \frac{EC}{LCS^2 + 1} = \frac{EC}{LC \left( S^2 + \frac{1}{LC} \right)} = \frac{E}{L \left( S^2 + \frac{1}{LC} \right)}.$$

Разделив числитель и знаменатель на  $\sqrt{LC}$ , получим:

$$I(s) = \frac{E}{L} \frac{1}{\left( S^2 + \frac{1}{LC} \right)} \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC}} = \frac{E}{L} \sqrt{LC} \frac{1/\sqrt{LC}}{\left( S^2 + \frac{1}{LC} \right)}.$$

Заменим  $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$ , тогда:

$$I(s) = E \sqrt{C/L} \frac{\omega}{S^2 + \omega^2}.$$

Выполнив обратное преобразование Лапласа, получим:

$$i(t) = E\sqrt{C/L} \sin \omega t.$$

Напряжение на конденсаторе будет:

$$v_c = \frac{1}{C} \int i \, dt;$$

$$v_c = \frac{1}{C} \int E\sqrt{C/L} \sin \omega t \, dt = -\frac{E}{\sqrt{LC}} \int \sin \omega t \, dt = E\omega \left| \frac{\cos \omega t}{\omega} \right|_0 = E(1 - \cos \omega t). \quad (3.1)$$

Сделаем замену  $\omega t = \theta$ , тогда:

$$v_c = E(1 - \cos \theta).$$

Когда  $\theta = \pi$ :

$$V_c = E(1 - \cos \pi) = 2E.$$

Энергия, запасенная в индуктивности, переходит в конденсатор после выключения тиристора, поэтому напряжение на конденсаторе увеличивается до величины  $2E$ .

### 3.4. Контур ударного возбуждения

Контур ударного возбуждения изображен на рис. 3.2. Понимание его принципа действия необходимо для анализа работы переключающих схем.

В контуре ударного возбуждения конденсатор  $C$  подключается к источнику питания  $E$  через замкнутый ключ  $S$  в положении 1. Далее ключ  $S$  переводится в положение 2. Цепь, состоящая из последовательно соединенного предварительно заряженного конденсатора, индуктивности и диода, называется контуром ударного возбуждения. На рис. 3.2а, цепь  $F$  представляет собой контур ударного возбуждения. Полярность напряжения на заряженном конденсаторе такова, что диод смещен в прямом направлении. При замыкании ключа  $S$  ток в цепи  $F$  протекает от обкладки  $b$  конденсатора через диод,  $L$  и  $C$ . В  $LC$ -цепи возникает колебательный процесс. К концу полупериода напряжение на конденсаторе спадает до нуля, и далее конденсатор начинает заряжаться в противоположном направлении. В замкнутом

конгуре  $V_L + V_C = 0$ . Изменение напряжения на индуктивности можно записать как  $V_L = L di/dt$ . На участке, где  $\theta$  изменяется от 0 до  $\pi/2$ , коэффициент  $di/dt$  положителен. Поэтому напряжение  $V_L$  положительно. Если  $\theta = \pi/2$ ,  $di/dt = 0$  и  $V_L = 0$ . Форму напряжения  $V_C$  на конденсаторе можно получить, используя уравнение  $V_C = -V_L$ . Ток в отрицательном направлении не протекает, так как диод при этом смещен в обратном направлении.

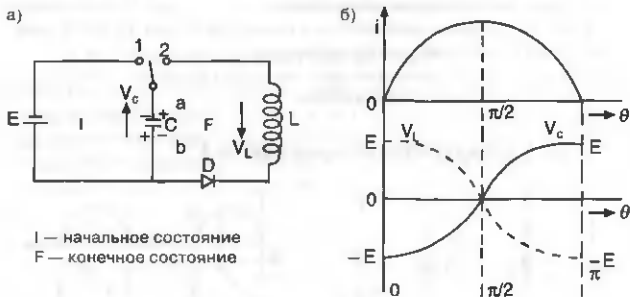


Рис. 3.2. Конгур ударного возбуждения:

а) Схема;

б) Формы тока и напряжения

### 3.5. Способы выключения тиристора

Ток через тиристор можно прервать с помощью ключа, соединенного с тиристором как последовательно, так и параллельно. Последовательный ключ должен размыкаться, а параллельный замыкаться, чтобы тиристор выключился. На практике эти способы обычно не используются. Практически используются метод естественного, или линейного, переключения и метод ускоренного переключения. В цепях переменного тока тиристор выключается, когда источник переменного тока изменяет полярность. Это называется методом линейного переключения.

В цепях постоянного тока тиристор находится в проводящем состоянии до тех пор, пока через него протекает ток в прямом направлении. Период проводимости продолжается до момента прерывания тока или до момента принудительного формирования обратного тока. Процесс

выключения тиристора обратным током называется принудительным выключением.

Способы переключения тиристора подразделяются на пять классов.

Класс А: Способ переключения за счет резонанса в нагрузке.

Класс В: Способ переключения с помощью последовательной  $LC$ -цепи.

Класс С: Способ переключения с помощью  $C$ - или  $LC$ -цепи, коммутируемой шунтирующим тиристором.

Класс D: Способ переключения с помощью  $C$ - или  $LC$ -цепи, коммутируемой вспомогательным тиристором.

Класс Е: Способ переключения с помощью внешнего импульса.

Класс F: Линейное переключение.

### 3.5.1. Способ переключения класса А

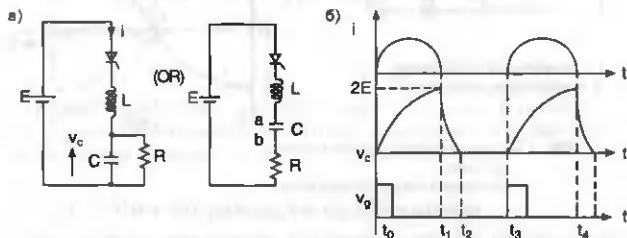


Рис. 3.3. Способ переключения класса А:

а) Электрическая схема;

б) Формы сигналов

Переключающие схемы класса А изображены на рис. 3.3а, а соответствующие формы сигналов — на рис. 3.3б. Нагрузочное сопротивление в этой схеме можно подключить к коммутационному конденсатору как последовательно, так и параллельно. Параметры элементов  $L$  и  $C$  выбраны из условия существования в цепи тиристора затухающих колебаний.

При включении тиристора напряжение на конденсаторе увеличивается от нуля до величины  $2E$ . Вследствие резонанса в последовательной  $LC$ -цепи электрический ток уменьшается до нуля и меняет свое направление. Анод тиристора находится под напряжением  $E$  относительно земли, в то время как катод — под напряжением  $2E$ .

Тиристор смещен в обратном направлении и находится в выключенном состоянии.

Электрический ток в цепи тиристора, как показано на рис. 3.3б, меняется синусоидально вследствие ударного возбуждения  $LC$ -контура в момент времени  $t_0$ . В момент времени  $t_1$  сила тока уменьшается до нуля. Этот процесс повторится, если в момент времени  $t_2$  тиристор снова включить. Таким образом, схема на рис. 3.3а является устройством переключения тиристора за счет резонанса в нагрузке.

### 3.5.2. Способ переключения класса В

Переключающая схема класса В изображена на рис. 3.4а, а соответствующие формы сигналов — на рис. 3.4б.  $LC$ -цепь на схеме подсоединена параллельно тиристор. Перед включением тиристора на конденсаторе  $C$  присутствует напряжение питания  $E$ . При включении тиристора через  $LC$ -цепь начинает протекать ток.

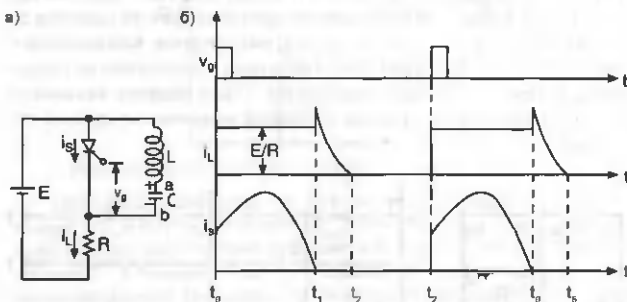


Рис. 3.4. Способ переключения класса В.

а) Электрическая схема;  
б) Формы сигналов

На промежутке времени  $t_0 - t_1$  через тиристор протекает сумма токов нагрузки и  $LC$ -цепи. Поэтому ток через тиристор увеличивается с увеличением тока, протекающего в  $LC$ -цепи. Далее полярность тока, протекающего через  $LC$ -цепь, меняется на обратную, ток через тиристор уменьшается и в момент времени  $t_1$  становится равным нулю. Тиристор выключается. Для надежного выключения тиристора резонансный ток в  $LC$ -цепи должен быть больше, чем максимальный ток нагрузки,

а время спада этого тока должно быть больше, чем время выключения тиристора. Конечная полярность напряжения на конденсаторе такова, что она обратно смещает тиристор. Далее конденсатор снова заряжается до напряжения питания  $E$  и при следующем включении тиристора процесс повторяется.

Следует отметить, что элементы  $LC$ -цепи не несут ток нагрузки.

### 3.5.3. Способ переключения класса С

Переключающая схема класса С изображена на рис. 3.5а, а соответствующие формы сигналов — на рис. 3.5б. Нагрузки  $R_1$  и  $R_2$  поочередно подключаются к источнику напряжения  $E$  через тиристорные ключи  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. При  $t = t_0$  тиристор  $S_1$  включается. Конденсатор  $C$  через резистор  $R_2$  заряжается до напряжения  $E$ . При  $t = t_1$  включается тиристор  $S_2$ , напряжение заряженного конденсатора прикладывается к тиристор  $S_1$  в обратном направлении через включенный тиристор  $S_2$ . Конденсатор разряжается через  $S_1$ , и  $S_1$  выключается. Конденсатор  $C$  через резистор  $R_1$  перезаряжается в обратном направлении до напряжения  $E$ . При  $t = t_2$  процесс повторяется. Таким образом, включение одного из тириستоров является причиной выключения другого тиристора.

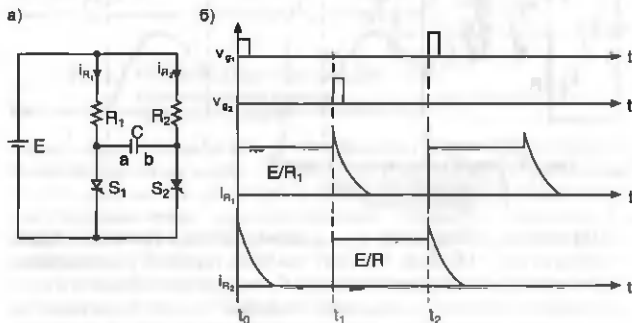


Рис. 3.5. Способ переключения класса С

а) Электрическая схема

б) Формы сигналов

### 3.5.4. Способ переключения класса D

Переключающая схема класса D изображена на рис. 3.6а, а соответствующие формы сигналов на рис. 3.6б.  $S_m$  и  $S_A$  соответственно главный и вспомогательный тиристоры. Сначала конденсатор заряжается через включенный тиристор  $S_A$  до напряжения на закрытом тиристоре  $S_m$ . Тиристор  $S_A$  естественно выключается после полного заряда конденсатора, когда ток, протекающий через конденсатор, падает ниже значения тока фиксации его проводящего состояния.

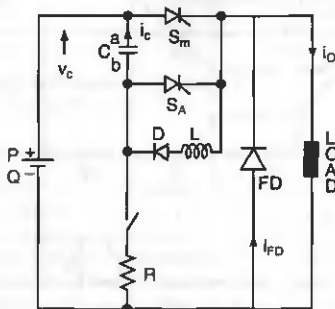


Рис. 3.6а. Способ переключения класса D

Тиристор  $S_m$  включается при  $t = 0$ , ток нагрузки протекает через источник  $E$ ,  $S_m$  и нагрузку. Элементы  $S_m$ ,  $L$ ,  $D$  и  $C$  образуют контур ударного возбуждения, через который протекает коммутирующий ток. В течение времени  $0 - t_1$  ток через тиристор  $S_m$  является суммой тока нагрузки и коммутирующего тока. Полярность напряжения на конденсаторе вследствие колебательного процесса меняется на противоположную полярность и вследствие присутствия в цепи диода  $D$  далее сохраняется. Таким образом, ток через конденсатор протекает только в течение времени  $0 - t_1$ . При этом тиристор  $S_A$  оказывается смещенным в прямом направлении. При включении тиристора  $S_A$  в момент времени  $t_2$  конденсатор  $C$  разряжается через тиристор  $S_m$ , через тиристор  $S_m$  начинает протекать большой ток в противоположном направлении и он переходит в закрытое состояние. Конденсатор перезаряжается через включенный тиристор  $S_A$  до напряжения на закрытом тиристоре  $S_m$ , и при  $t = t_2$  процесс повторяется. Полное описание этой схемы дается в разделе 5.5 главы 5.

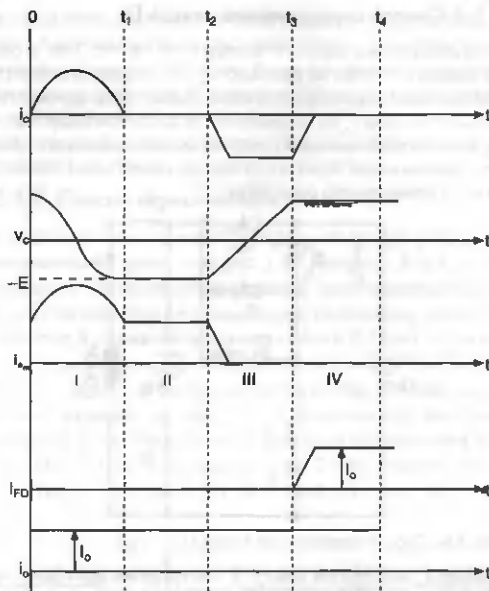


Рис. 3.66. Формы сигналов при переключении способом класса D

### 3.5.5. Способ переключения класса E

Этот способ также называется переключением с помощью внешнего импульса.

Переключающая схема класса E и соответствующие ей формы сигналов приведены на рис. 3.7. Внешний импульсный источник производит энергию, необходимую для переключения тиристора. Когда на обмотке трансформатора II, помеченной точкой, напряжение положительное, на обмотке трансформатора I, помеченной точкой, напряжение также положительное.

Импульсное напряжение на обмотке I вызывает обратный ток в цепи тиристора, что приводит к его запираанию.



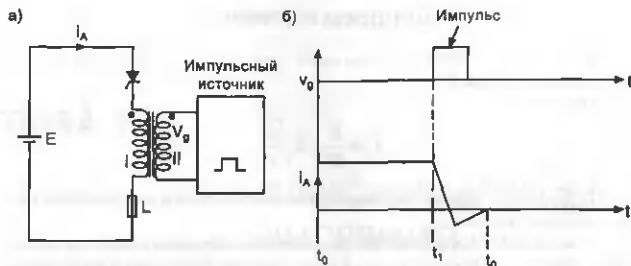


Рис. 3.7. а) Способ переключения класса Е;  
б) Формы сигналов

### 3.5.6. Способ переключения класса F

Переключающая схема класса F изображена на рис. 3.8а, а соответствующие формы сигналов на рис. 3.8б. Способ переключения класса F называется линейным переключением или естественным переключением. При  $\theta = \alpha$  тиристор включается и находится в проводящем состоянии при значениях углов от  $\alpha$  до  $\pi$ . При  $\theta = \pi$  сила протекающего тока уменьшается до нуля и тиристор естественным образом выключается. При значениях углов от  $\pi$  до  $2\pi$  тиристор обратно смещен и ток не проводит.

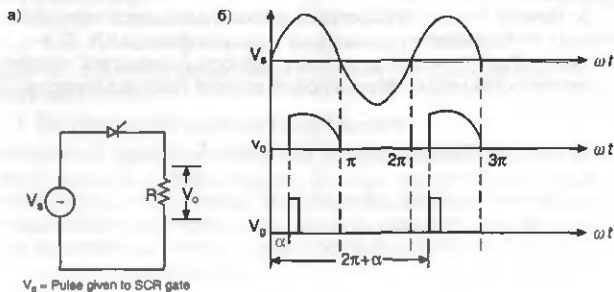


Рис. 3.8. Способ переключения класса F:  
а) Электрическая схема;  
б) Формы сигналов

## Вопросы и ответы

1. Каково пиковое значение силы тока тиристора при способе переключения класса В?

*Ответ*

$$I_p = \frac{E}{R} + E\sqrt{\frac{C}{L}}$$

2. Сравните способ переключения напряжением со способом переключения током.

*Ответ.* При переключении напряжением предварительно заряженный конденсатор подключается к включенному тиристор и выключает его большим обратным током. Это быстрый способ переключения.

При переключении током предварительно заряженный конденсатор, включенный последовательно с индуктивностью, создает большой обратный ток через тиристор и выключает его. Это более медленный способ переключения.

3. Каков самый популярный метод принудительного переключения?

*Ответ.* Класс D

4. Почему способ переключения класса F называется линейным переключением?

*Ответ.* Линейное напряжение смещает тиристор в обратном направлении.

5. Почему способ переключения класса А называется переключением за счет нагрузки?

*Ответ.* Резистивная нагрузка, индуктивность  $L$  и емкость  $C$  являясь электрической цепью, формирующей нулевой ток через тиристор.

## ГЛАВА 4

# ФАЗОУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

### 4.1. Введение

Устройство для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока называется выпрямителем. Основные области применения выпрямителей:

- 1) регулирование скорости вращения электродвигателей постоянного тока;
- 2) зарядные устройства;
- 3) источники бесперебойного питания;
- 4) нанесение гальванических покрытий;
- 5) электролиз.

### 4.2. Классификация выпрямителей

По своим характеристикам схемы выпрямителей классифицируются следующим образом.

#### I. По управлению выходным напряжением

Выпрямители, выходное напряжение которых невозможно регулировать, называются неуправляемыми. В схемах неуправляемых выпрямителей используются диоды. Выпрямители, выходное напряжение которых можно регулировать, называются управляемыми. В схемах таких выпрямителей используются либо только тиристоры, либо комбинация тиристоров и диодов.

#### II. По форме напряжения на входе

Выпрямитель, выходное напряжение которого соответствует только одному полупериоду входного напряжения, называется однополупериодным.

Выпрямитель, выходное напряжение которого соответствует положительному и отрицательному полупериодам входного напряжения, называется двухполупериодным.

### III. По числу фаз входного напряжения

Напряжение переменного тока на входе выпрямителя может быть однофазным, трехфазным или многофазным. В зависимости от количества фаз входного напряжения выпрямители называются однофазными или многофазными.

### IV. По количеству повторяющихся сегментов в форме выходного напряжения

Форма выходного напряжения соответствует сегментам входного переменного напряжения и эти сегменты повторяются соответственно каждому циклу входного напряжения. В зависимости от количества сегментов выпрямитель классифицируется как одноимпульсный, двух-, трех-, шести- или двенадцатимпульсный.

### V. По виду вольт-амперных характеристик

Постоянная составляющая тока в выпрямителе течет в одном направлении благодаря выпрямляющему свойству таких приборов, как диоды и тиристоры. Если полярность усредненного выходного напряжения остается неизменной, то вольт-амперная характеристика находится в первом квадранте и выпрямитель называется одноквадрантный. Если полярность меняется, он функционирует в двух квадрантах и называется двухквадрантным. Если два таких выпрямителя соединены параллельно навстречу друг другу, то ток и напряжение могут менять полярность. В этом случае выпрямитель может работать в четырех квадрантах и называется четырехквадрантным или двойным выпрямителем. Одноквадрантный выпрямитель использует или только диоды, либо диоды и тиристоры. Он называется также полууправляемым выпрямителем. Двухквадрантный выпрямитель использует только тиристоры и называется полностью управляемым выпрямителем.

### VI. По направлению передачи мощности

Выпрямитель называется однонаправленным, если при его работе мощность передается от источника переменного тока в нагрузку в одном направлении. Выпрямитель называется двунаправленным, если

возможен режим работы, когда мощность может передаваться в двух направлениях.

### 4.3. Параметры выпрямителей

Наилучшими параметрами обладают выпрямители, выходное напряжение которых не имеет пульсаций, входной ток не отклоняется от синусоидальной формы и коэффициент использования мощности источника переменного тока равен единице. На практике выпрямители не обладают такими параметрами. Выходное напряжение реального выпрямителя имеет переменную составляющую (пульсации напряжения). Потребляемый от источника переменный ток несинусоидален. В его спектре содержатся основная частота и гармонические составляющие. Использование мощности источника переменного тока неполное, даже при работе выпрямителя на активную нагрузку. К тому же коэффициент использования мощности источника уменьшается при увеличении угла включения тиристора. В целом искажение формы переменного тока, коэффициент использования мощности и другие факторы определяют качество выпрямителя. Они рассчитываются исходя из определенных параметров, заданных для источника входного напряжения и параметров нагрузки.

#### 4.3.1. Выходные параметры

##### Выходные параметры выпрямителя

- Среднее постоянное выходное напряжение выпрямителя  $V_{dc}^*$ ;
- Средний постоянный выходной ток выпрямителя  $I_{dc}^*$ ;
- Постоянная выходная мощность выпрямителя  $P_{dc} = V_{dc} I_{dc}^*$ .

##### Выходные среднеквадратические параметры выпрямителя

На выходе выпрямителя присутствуют как постоянная, так и переменная составляющие напряжения и тока. Их среднеквадратические значения обозначаются следующим образом:

- Среднеквадратическое выходное напряжение выпрямителя  $V_{rms}^*$ ;
- Среднеквадратический выходной ток выпрямителя  $I_{rms}^*$ ;
- Полная выходная мощность выпрямителя  $P_{ac} = V_{rms} I_{rms}^*$ .

### Эффективность выпрямления

Выходная мощность выпрямителя  $P_{dc}$  определяется величиной среднего значения выходного напряжения и среднего значения выходного тока выпрямителя, тогда как полная выходная мощность  $P_{ac}$  определяется как постоянной, так и переменной составляющими выходного напряжения и выходного тока. Переменная составляющая выходного напряжения выпрямителя практически определяет его потери. Эффективность выпрямителя определяется величинами  $P_{dc}$  и  $P_{ac}$ . Эффективность выпрямления или коэффициент выпрямления  $\eta$  определяется как

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{rms} I_{rms}}, \quad (4.1)$$

### Переменная составляющая напряжения на выходе выпрямителя

Среднеквадратическое значение выходного напряжения зависит как от среднего постоянного выходного напряжения, так и от величины его переменной составляющей.

Среднеквадратическое значение переменной составляющей напряжения можно получить из выражения:

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}.$$

На выходе качественного выпрямителя переменная составляющая  $V_{ac}$  должна быть насколько возможно низкой. Благодаря этому увеличивается эффективность выпрямителя, а также снижаются требования к выходному фильтру.

### Форм-фактор

Качество выходного напряжения зависит от соотношения его постоянной и переменной составляющих, для определения которого вводится понятие форм-фактора. Форм-фактор (FF) рассчитывается по формуле:

$$FF = V_{rms} / V_{dc}$$

Форм-фактор высококачественного выпрямителя близок к единице.

### Коэффициент пульсаций

Вследствие присутствия переменной составляющей выходное напряжение выпрямителя изменяется. Разница между максимальным и минимальным выходным напряжением называется размахом пульсаций напряжения. Коэффициент пульсаций (RF) определяется так:

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2} - 1. \quad (4.2)$$

### 4.3.2. Входные параметры

#### Коэффициент сдвига фаз

Напряжение, приложенное ко входу выпрямителя, синусоидально, в то время как входной ток несинусоидален вследствие нелинейности выпрямляющих элементов. В спектре входного тока имеется основная частота. Разность значений фазовых углов основной гармоники входного тока и входного напряжения называется углом запаздывания. В случае управляемого выпрямителя угол запаздывания увеличивается при увеличении угла задержки запуска тиристора.

Коэффициент сдвига фаз (DF) определяется так:

$$DF = \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  — разность значений фазовых углов основной гармоники входного тока и входного напряжения.

#### Коэффициент гармоник входного тока

Вследствие несинусоидальности своей природы ток, поступаемый на вход выпрямителя, содержит не только основную частоту, но и ее гармоники. Величину гармонических составляющих входного тока  $I_h$  можно получить путем вычитания основной компоненты  $I_1$  из полного среднеквадратического тока на входе выпрямителя  $I_3$ . Вклад гармоник входного тока определяется коэффициентом гармоник (HF), который может быть рассчитан следующим образом:

$$HF = \frac{I_h}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2} - 1. \quad (4.3)$$

Чем ниже значение коэффициента гармоник, тем выше качество выпрямителя.

### Входной коэффициент мощности

В большинстве случаев коэффициент мощности определяется следующим образом:

$$\text{Коэффициент мощности} = \frac{\text{Активная мощность}}{\text{Кажущаяся мощность}}.$$

Активная мощность определяется произведением величин синусоидального входного напряжения и основной гармоники входного тока. Кажущаяся мощность является произведением среднеквадратического значения напряжения  $V_3$  и среднеквадратического значения тока  $I_3$ , в которое также входит основная гармоника тока.

$$\text{Активная мощность} = V_3 I_1 \cos \varphi;$$

$$\text{Кажущаяся мощность} = V_3 I_3.$$

Тогда:

$$\text{Входной коэффициент мощности} = \frac{V_3 I_1 \cos \varphi}{V_3 I_3} = \frac{I_1}{I_3} \cos \varphi. \quad (4.4)$$

### Коэффициент полезного действия трансформатора

Если нагрузка трансформатора активная, переменный ток протекает через его обмотки в течение всего периода. Когда трансформатор нагружен на выпрямитель, ток протекает через его обмотки только в течение части периода, следовательно, мощность трансформатора используется не полностью. Степень использования трансформатора определяется как коэффициент полезного действия трансформатора (TUF), который рассчитывается по формуле:

$$\text{TUF} = \frac{P_{dc}}{m V_3 I_3}, \quad (4.5)$$

где  $V_3$  — среднеквадратическое значение фазового напряжения трансформатора;

$I_3$  — полный среднеквадратический фазовый ток в обмотке трансформатора;

$m$  — количество фаз трансформатора.

Следует заметить, что в выражении (4.5)  $P_{dc}$  подставляется в ваттах, а  $m V_3 I_3$  — в вольт-амперах.



#### 4.4. Однофазные выпрямители

Такие выпрямители питаются однофазным переменным током. Однофазные выпрямители могут быть однополупериодные и двухполупериодные. Двухполупериодный выпрямитель может быть с трансформатором, вторичная обмотка которого имеет отвод в центре, или с вторичной обмоткой без отвода и мостовым выпрямителем.

В неуправляемом однофазном выпрямителе для выпрямления используются только диоды, в то время как в однофазных управляемых выпрямителях используются тиристоры с диодами или без них. Если в схеме используются только тиристоры, то выпрямитель называется двухполупериодным управляемым выпрямителем, а если используется комбинация тиристоров и диодов, то выпрямитель называется однополупериодным выпрямителем.

#### 4.5. Однополупериодный управляемый выпрямитель с резистивной нагрузкой

Устройство называется однополупериодным выпрямителем потому, что тиристор проводит только при положительном полупериоде переменного напряжения. В момент времени  $\theta = \alpha$  тиристор включается и остается в проводящем состоянии до момента времени  $\theta = \pi$ . В течение второго полупериода тиристор смещен в обратном направлении и не проводит ток. При увеличении угла включения среднее выходное напряжение уменьшается, так как тиристор находится во включенном состоянии меньшее время. Моментом включения тиристора можно управлять посредством регулировки угла включения. Такой тип выпрямителей называется однополупериодными управляемыми выпрямителями.

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_s d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{2\pi} [\cos \theta]_{\alpha}^{\pi} = \\
 &= \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha).
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

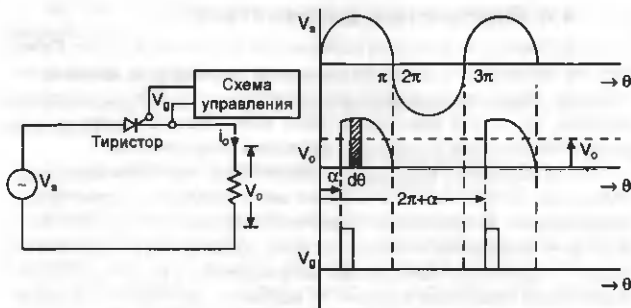


Рис. 4.1. Однополупериодный выпрямитель

#### 4.6. Однополупериодный управляемый выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой

Ток через тиристор начинает протекать с запаздыванием на угол  $\alpha$ . Если тиристор находится в проводящем состоянии, то величина напряжения на нагрузке равняется величине напряжения источника питания. В случае резистивно-индуктивной нагрузки тиристор остается в проводящем состоянии при  $\alpha > \pi$ , поскольку в последовательной цепи продолжает протекать ток за счет энергии, запасенной в индуктивности  $L$ .

При изменении угла от  $\alpha$  до  $\pi$  напряжение  $V_o$  в цепи и ток  $i$  положительные. Энергия передается от источника  $V_s$  к нагрузке. При изменении угла от  $\pi$  до  $\beta$  ток  $i$  в цепи положительный, а  $V_o$  — отрицательное, запасенная в индуктивности энергия передается обратно в источник. Этот процесс называется рециркуляцией. Рециркуляция продолжается до тех пор, пока энергия индуктивности передается источнику. Среднее напряжение на нагрузке уменьшается благодаря процессу рециркуляции. Чем больше индуктивность, тем продолжительней участок с отрицательным напряжением, и наоборот. Формы сигналов в последовательной цепи с резистивно-индуктивной нагрузкой изображены на рис. 4.26.

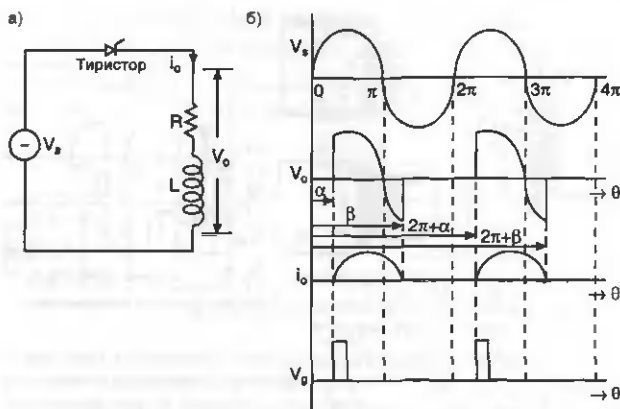


Рис. 4.2. а) Однополупериодный выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой;  
б) Формы сигналов

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_s d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m \sin \theta d\theta ;$$

$$V_0 = \frac{V_m}{2\pi} [\cos \theta]_{\beta}^{\alpha} = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) ;$$

$$V_0 = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) . \quad (4.7)$$

#### 4.7. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивной нагрузкой

В течение положительного полупериода напряжения тиристор  $S_1$  смещен в прямом направлении и проводит ток при значениях угла от  $\alpha$  до  $\pi$ . Ток при этом протекает от вывода обмотки А трансформатора, помеченного точкой, через тиристор  $S_1$ , нагрузку  $R$  и вывод обмотки А, не помеченный точкой. Полярность напряжения на нагрузке  $R$  показана на рис. 4.3.

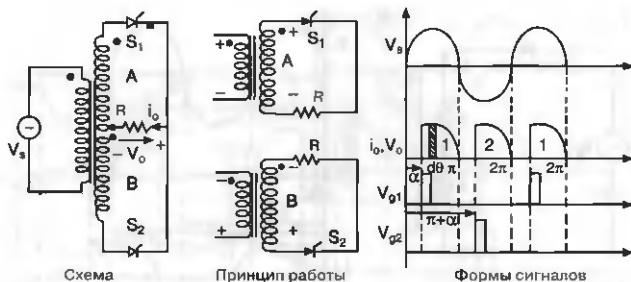


Рис. 4.3. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивной нагрузкой

В течение отрицательного полупериода напряжения тиристор  $S_2$  смещен в прямом направлении и проводит ток при значении угла от  $\pi + \alpha$  до  $2\pi$ . Ток при этом протекает от вывода обмотки В трансформатора, не помеченного точкой, через тиристор  $S_2$ , нагрузку  $R$  и вывод обмотки В, помеченный точкой. Направление тока в нагрузке и полярность выходного напряжения остаются теми же, что и при положительном полупериоде. Таким образом, выпрямитель, схема которого изображена на рис. 4.3, преобразует двунаправленный ток в однонаправленный.

Такая схема называется двухполупериодным управляемым выпрямителем, так как выходным напряжением можно управлять в течение всего времени. Такое устройство также называется двухполупериодным импульсным преобразователем. Среднее выходное напряжение на нагрузке в этой схеме вдвое больше, чем у однополупериодного управляемого выпрямителя с резистивной нагрузкой.

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_s d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\pi} =$$

$$= \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) = \frac{V_m}{\pi} [\cos \alpha - (-1)];$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha). \quad (4.8)$$

### 4.8. Однофазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель

Схема однофазного управляемого мостового выпрямителя, изображенная на рис. 4.4, состоит из четырех тиристоров.

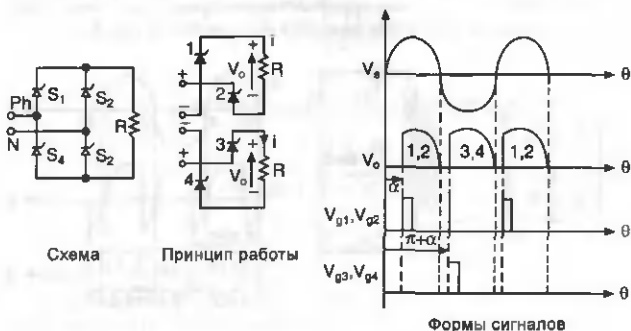


Рис. 4.4. Однофазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель

В течение положительного полупериода напряжения тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  смещены в прямом направлении. Если они включены одновременно в момент времени  $\alpha$ , ток протекает по пути  $Ph-S_1-R-S_2-N$ . Напряжение на нагрузке в этом случае является сегментом напряжения питания на отрезке  $\alpha - \pi$ .

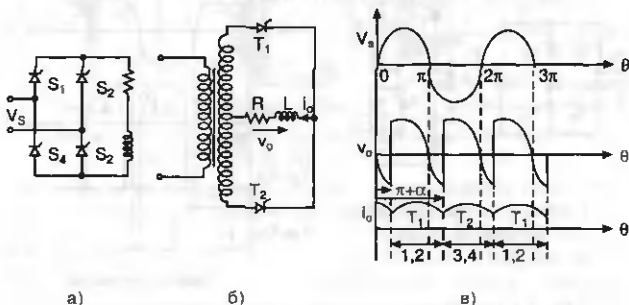
В течение отрицательного полупериода тиристоры  $S_3$  и  $S_4$  смещены в прямом направлении. Если они включены одновременно в момент времени  $(\pi + \alpha)$ , ток протекает по пути  $N-S_3-R-S_4-Ph$ . Напряжение на нагрузке в этом случае является сегментом напряжения питания на отрезке времени от  $(\pi + \alpha)$  до  $2\pi$ .

Если пиковое входное напряжение в мостовом выпрямителе обозначить как  $V_m$ , то максимальное пиковое напряжение закрытого тиристора будет  $2V_m$ .

Среднее выходное напряжение на нагрузке можно определить как  $(1 + \cos \alpha)V_m/\pi$ .

### 4.9. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой

Формы сигналов для мостового выпрямителя и двухполупериодного выпрямителя с отводом от центра обмотки трансформатора одинаковые. Поэтому их схемы можно объединить, как показано на рис. 4.5а.



$T_1, T_2$  — для выпрямителя  
с отводом от центра  
обмотки трансформатора  
1, 2, 3, 4 — для мостового выпрямителя

Рис. 4.5а. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой:

- а) Мостовая схема;
- б) Двухполупериодный выпрямитель;
- в) Формы сигнала

В мостовой схеме в момент времени  $\alpha$  тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  запускаются. Они проводят ток при значении угла от  $\alpha$  до  $(\pi + \alpha)$ . В момент времени  $(\pi + \alpha)$  запускаются тиристоры  $S_3$  и  $S_4$ . Тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  при этом оказываются обратно смещенными и переходят в выключенное состояние. Тиристоры  $S_3$  и  $S_4$  остаются в проводящем состоянии при значении угла от  $(\pi + \alpha)$  до  $(2\pi + \alpha)$ , и далее вышеупомянутый процесс повторяется. Формы сигналов для выходного напряжения и тока изображены на рис. 4.5а для случая большой индуктивности и пренебрежимо малого сопротивления.

В случае двухполупериодного выпрямителя с отводом от центра обмотки трансформатора тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  находятся в проводящем состоянии поочередно и формы сигналов при этом аналогичны случаю мостовой схемы.

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v \, d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \theta \, d\theta;$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} \left[ -\cos \theta \right]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{V_m}{\pi} \left[ -\cos \theta \right]_{\pi+\alpha}^{\alpha} =$$

$$= \frac{V_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)];$$

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha. \quad (4.9)$$

Если значение угла  $\alpha$  находится между 0 и 90°, схема работает как выпрямитель. Передача мощности происходит от источника переменного тока в нагрузку. Мощность  $P_0 = V_0 I_0$ , где  $V_0$ ,  $I_0$  и  $P_0$  имеют положительные значения. Если угол запуска тиристоров  $\alpha$  лежит в диапазоне от  $\pi/2$  до  $\pi$ , среднее выходное напряжение преобразователя отрицательное. Преобразователь работает как инвертор. Мощность при этом передается от источника постоянного тока в цепь переменного тока. Такой режим работы преобразователя называется регенерацией, то есть он работает как линейно коммутируемый инвертор.

Пример регенерации: электровоз при подъеме в гору является потребителем мощности источника переменного тока, а при спуске с горы он является источником постоянного тока и отдает затраченную мощность обратно в источник переменного тока.

Формы сигналов для прерывистой передачи тока показаны на рис. 4.56. При значении угла  $\alpha$  тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  включаются и остаются в проводящем состоянии вплоть до значения угла  $\beta$  когда ток уменьшается до нуля. При значении угла  $\pi + \alpha$  включаются тиристоры  $S_3$  и  $S_4$ , далее процесс повторяется. Из формы сигнала тока видно, что процесс переключения может происходить с прерыванием передачи тока.

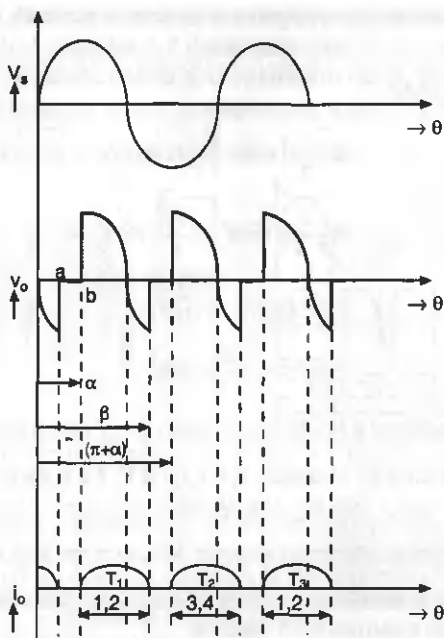


Рис. 4.56. Формы сигналов для разрывной передачи тока

#### 4.10. Двухполупериодный управляемый выпрямитель с индуктивным источником

Принцип работы двухполупериодного управляемого выпрямителя с индуктивным источником (рис. 4.6а) можно понять из эквивалентной схемы, изображенной на рис. 4.6б.

Источник  $V_1$  смещает в прямом направлении тиристоры  $S_1$  и  $S_2$ . Источник  $V_2$  смещает в прямом направлении тиристоры  $S_3$  и  $S_4$  в



противофазе с источником  $V_1$ . Тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  находятся в проводящем состоянии до значения угла  $\pi + \alpha$ . При значении угла  $\pi + \alpha$  включаются тиристоры  $S_3$  и  $S_4$ . Электрический ток не может моментально переключиться с цепи тириستоров  $S_1, S_2$  на цепь тиристоров  $S_3, S_4$  из-за наличия индуктивности в цепи источника питания. Ток, протекающий через тиристоры  $S_1$  и  $S_2$ , постепенно уменьшается, а ток, протекающий через тиристоры  $S_3$  и  $S_4$ , постепенно возрастает так, что суммарный ток остается равным постоянному току нагрузки.

Предположим, что ток должен оставаться постоянным, поскольку со стороны нагрузки включена большая индуктивность. Время, когда все тиристоры находятся в проводящем состоянии, называется периодом перекрытия. Соответствующий этому периоду угол —  $u$ . При значении угла  $\pi + \alpha + u$  тиристор  $S_3$  и  $S_4$  находятся в проводящем состоянии, и вышеупомянутые процессы повторяются.

$$V_{du} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v d\theta.$$

Интеграл в пределах от  $\alpha$  до  $(\pi + \alpha)$  равен сумме интеграла в пределах от  $\alpha$  до  $(\alpha + u)$  и интеграла в пределах от  $(\alpha + u)$  до  $(\pi + \alpha)$ . Достаточно проинтегрировать от  $(\alpha + u)$  до  $(\pi + \alpha)$ , так как подынтегральная функция равна нулю в пределах от  $\alpha$  до  $(\alpha + u)$ .

$$\begin{aligned} V_{du} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha+u}^{\pi+\alpha} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha+u}^{\pi+\alpha} = \\ &= \frac{V_m}{\pi} [\cos(\alpha + u) - \cos(\pi + \alpha)]; \\ V_{du} &= \frac{V_m}{\pi} [\cos \alpha + \cos(\alpha + u)], \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $V_{du}$  — среднее выходное напряжение данного перекрытия.

Вследствие эффекта перекрытия уменьшаются среднее выходное напряжение и коэффициент мощности.

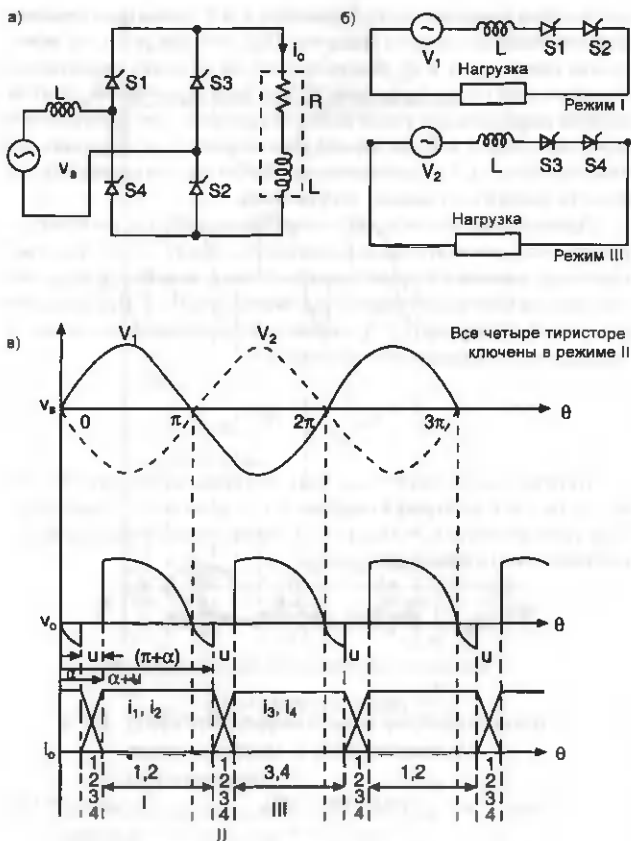


Рис. 4.6. а) Двухполупериодный преобразователь.  
 б) Эквивалентная схема;  
 в) Формы сигналов с учетом наложения

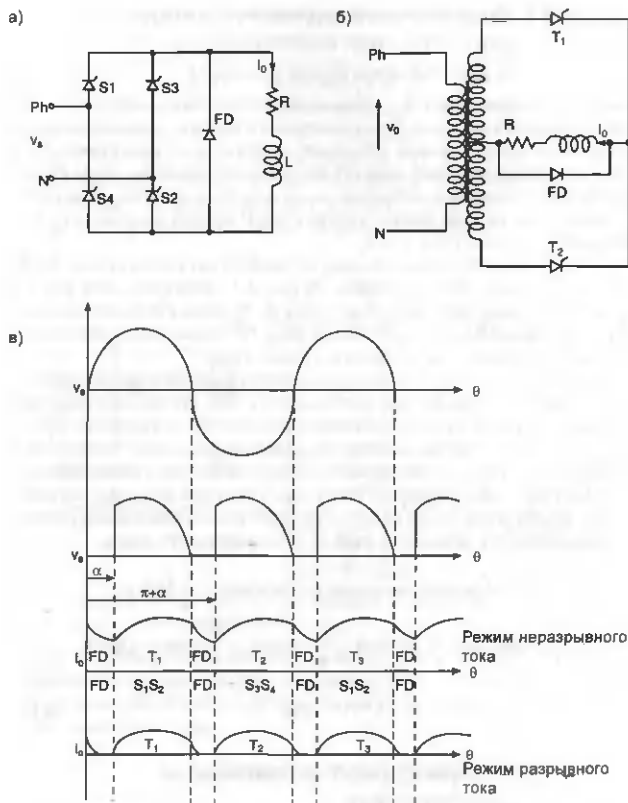


Рис. 4.7. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с демпфирующим диодом:  
 а) Мостовой выпрямитель;  
 б) Выпрямитель с отводом от центра обмотки трансформатора;  
 в) Формы сигналов

#### 4.11. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с демпфирующим диодом

Когда  $\theta = \alpha$  тиристоры  $S_1$  и  $S_2$  открываются и остаются в открытом состоянии в пределах от  $\alpha$  до  $\pi$ . При увеличении  $\theta$  более  $\pi$ , производная  $di/dt$  становится отрицательной. Обратное напряжение на индуктивности  $L$  смещает демпфирующий диод  $FD$  в прямом направлении. Диод  $FD$  находится в проводящем состоянии до тех пор, пока энергия, запасенная в индуктивности  $L$ , не уменьшится до нуля. В момент времени от  $(\pi + \alpha)$  открываются тиристоры  $S_3$  и  $S_4$ .

Электрические схемы и формы сигналов в случае нагрузки с большой индуктивностью приведены на рис. 4.7. Электрический ток  $i_0$  в такой схеме протекает через тиристоры  $S_1$ ,  $S_2$ , диод  $FD$ , далее тиристоры  $S_3$ ,  $S_4$ , диод  $FD$  и так далее. Когда диод  $FD$  находится в проводящем состоянии, напряжение на нагрузке равно нулю.

Достоинство схемы двухполупериодного управляемого выпрямителя с демпфирующим диодом заключается в том, что среднее выходное напряжение на нагрузке увеличивается вследствие исключения областей с отрицательной проводимостью с одновременным увеличением коэффициента мощности, так как демпфирующий диод предотвращает передачу энергии, запасенной в нагрузке, обратно в источник питания. Недостатком такой схемы является невозможность реализации режима рециркуляции из-за наличия в схеме демпфирующего диода.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \text{Среднее выходное напряжение} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_d d\theta = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi); \\
 V_0 &= \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha), \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

#### 4.12. Полумостовой управляемый выпрямитель

Схема полумостового управляемого выпрямителя, изображенного на рис. 4.8, состоит из двух тиристоров и двух диодов. В момент времени  $\theta = \alpha$  тиристор  $S_1$  открывается. В течение положительного полупериода тиристор  $S_1$  и диод  $D_2$  находятся в проводящем состоянии. Тиристор  $S_1$

продолжает находиться в проводящем состоянии в момент времени от  $\pi$  до  $\beta$  за счет энергии, запасенной в индуктивности. В момент времени от  $\pi$  до  $\beta$  тиристор  $S_1$  и диод  $D_1$  находятся в проводящем состоянии за счет напряжения, присутствующего на нагрузке.

Этот момент времени называется временем собственного обратного хода. В момент времени  $\theta = \pi + \alpha$  открывается тиристор  $S_2$ . Тиристор  $S_2$  и диод  $D_1$  находятся в проводящем состоянии от значения  $\theta = \pi + \alpha$  до  $2\pi$ . Далее время собственного обратного хода в схеме образуется за счет протекания тока через тиристор  $S_2$  и диод  $D_2$ . При  $\theta = \alpha + 2\pi$  запускается тиристор  $S_1$  и вышеупомянутые процессы повторяются.

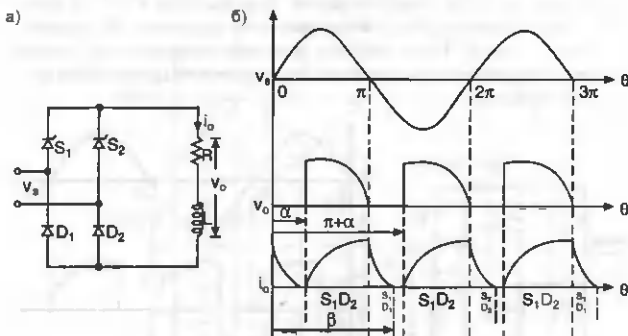


Рис. 4.8. а) Полумостовой управляемый выпрямитель;

б) Формы сигналов

В полумостовом управляемом выпрямителе режим собственного обратного хода, как правило, не используется. Причина состоит в том, что режим собственного обратного хода увеличивает среднее значение тока через тиристоры.

$V_0$  = Среднее выходное напряжение =

$$= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\pi};$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha); \quad (4.12)$$

### 4.13. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с одним тиристором

Схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя с одним тиристором изображена на рис. 4.9. В момент времени  $\theta = \alpha$  тиристор открывается, начинает протекать ток через диод  $D_1$ , тиристор, нагрузку и диод  $D_2$ . Напряжение на нагрузке в этом случае является сегментом напряжения питания на отрезке  $\alpha - \pi$ .

В диапазоне значений  $\theta$  от  $\pi + \alpha$  депмфирующий диод  $FD$  находится в состоянии проводимости. При значении  $\theta = \pi + \alpha$  тиристор снова включается. Теперь ток протекает через диод  $D_3$ , тиристор, нагрузку и диод  $D_4$ . Таким образом, выходное напряжение на нагрузке является положительным в течение отрицательного полупериода входного напряжения.

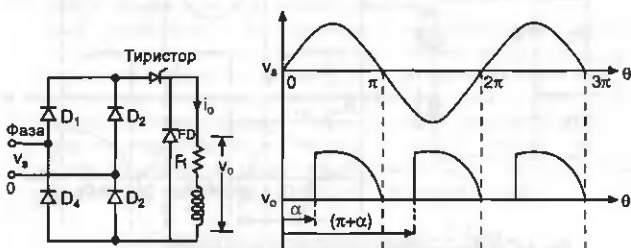


Рис. 4.9. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель с одним тиристором

### 4.14. Трехфазный однополупериодный управляемый выпрямитель

Электрическая схема трехфазного однополупериодного управляемого выпрямителя изображена на рис. 4.10а. В любой момент времени в этой схеме один из тиристоров находится в проводящем состоянии. Если угол  $\alpha = 0$ , тиристор  $T_1$  включается при значении угла  $30^\circ$ , а при  $150^\circ$  включается тиристор  $T_2$ . В диапазоне значений угла от  $150^\circ$  до  $180^\circ$  величина фазового напряжения  $v_b$  больше, чем  $v_a$ , поэтому тиристор  $T_1$  оказывается смещенным в обратном направлении и выключается.

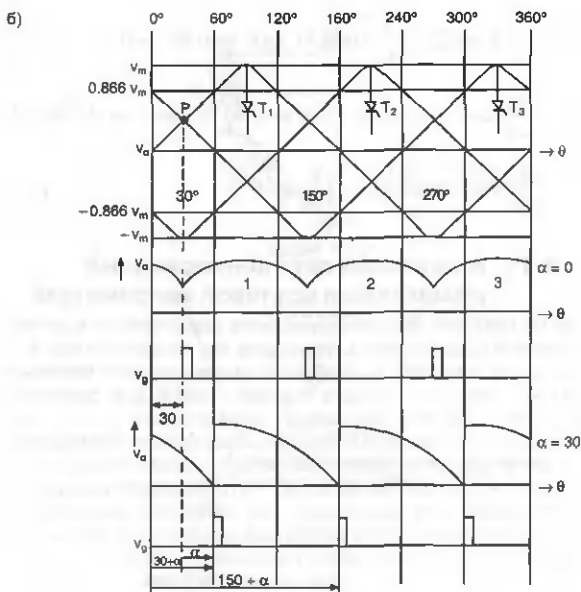
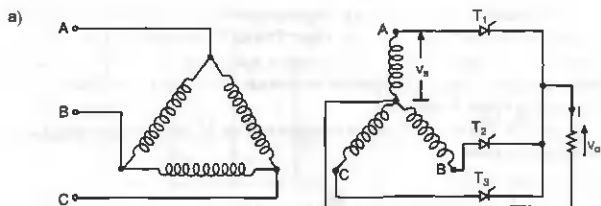


Рис. 4.10. а) Трехфазный однополупериодный управляемый выпрямитель;  
б) Формы сигналов

Следовательно, запуск одного из тиристоров является причиной выключения ранее включенного тиристора. Точка **Р** называется естественной точкой переключения. В трехфазных выпрямителях значение угла запуска тиристора  $\alpha$  измеряется от точки **Р**. Формы сигналов в схеме показаны на рис. 4.10б.

Пиковое значение фазового напряжения  $V_m$  можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{2\pi/3} \int_{30^\circ+\alpha}^{150^\circ+\alpha} V_m \sin \theta \, d\theta = \frac{3V_m}{2\pi} [-\cos \theta]_{30^\circ+\alpha}^{150^\circ+\alpha} = \\ &= \frac{3V_m}{2\pi} [\cos \theta]_{150^\circ+\alpha}^{30^\circ+\alpha} = \frac{3V_m}{2\pi} [\cos(30^\circ + \alpha) - \cos(150^\circ + \alpha)] = \\ &= \frac{3V_m}{2\pi} [\cos 30^\circ \cos \alpha - \sin 30^\circ \sin \alpha - (\cos 150^\circ \cos \alpha - \sin 150^\circ \sin \alpha)] = \\ &= \frac{3V_m}{2\pi} [2 \cos 30^\circ \cos \alpha] = 3\sqrt{3} \frac{V_m}{2\pi} \cos \alpha \end{aligned} \quad (4.13)$$

#### 4.15. Трехфазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель

Схема трехфазного двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя содержит шесть тиристоров, как показано на рис. 4.11а. Пронумеруем тиристоры таким образом, что верхние будут нечетными, а нижние — четными. Разность номеров в любой фазе равняется 3. В любое время два тиристора: один из положительной ветви и один из отрицательной — находятся в проводящем состоянии. Эквивалентная схема для двухполупериодного трехфазного выпрямителя, показанного на рис. 4.11а, изображена на рис. 4.11б. Эквивалентная схема на рис. 4.11б может быть представлена как два последовательно соединенных однополупериодных трехфазных выпрямителя. На рис. 4.11в приведена эквивалентная схема трехфазного двухполупериодного выпрямителя для случая, когда тиристоры 1 и 6 находятся в проводящем состоянии. Следует заметить, что в отдельные моменты времени напряжение на нагрузке является сегментами фазовых переменных напряжений.



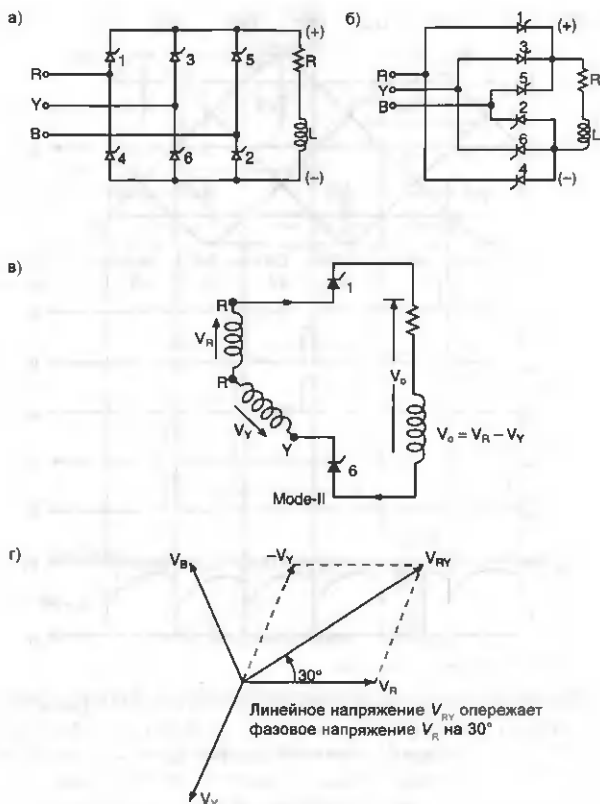


Рис. 4.11. а) Трехфазный мостовой выпрямитель;

б) Эквивалентная схема трехфазного мостового выпрямителя;

в) Эквивалентная схема для случая, когда тиристоры 1 и 6 находятся в проводящем состоянии;

г) Векторная диаграмма

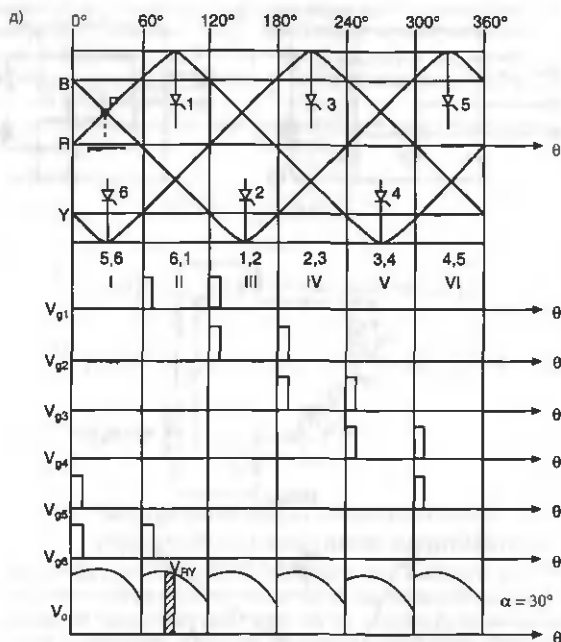


Рис. 4.11. д) Формы сигналов

Формы фазовых напряжений изображены на рис. 4.11 д. Тиристоры включаются парами в последовательности: 5—6, 6—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—5, 5—6, 6—1. Тиристор с нечетным номером при максимуме положительного напряжения на аноде и тиристор с четным номером при максимуме отрицательного напряжения на катоде будут находиться в проводящем состоянии, если они включены.

Из векторной диаграммы видно, что напряжение на нагрузке равно:

$$V_{RY} = \sqrt{3} V_m \sin (30^\circ + \theta).$$



Рис. 4.11. а) Одиночный сегмент выходного напряжения

Используя рис. 4.11а, можно записать среднее напряжение на нагрузке:

$$\begin{aligned}
 V_{RY} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{30^\circ+\alpha}^{90^\circ+\alpha} \sqrt{3}V_m \sin(30^\circ + \theta) d\theta \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [-\cos(30^\circ + \theta)]_{30^\circ+\alpha}^{90^\circ+\alpha} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [\cos(30^\circ + \theta)]_{90^\circ+\alpha}^{30^\circ+\alpha} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [\cos(60^\circ + \alpha) - \cos(120^\circ + \alpha)]; \\
 V_0 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [\cos 60^\circ \cos \alpha - \sin 60^\circ \sin \alpha - (\cos 120^\circ \cos \alpha - \sin 120^\circ \sin \alpha)] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [2\cos 60^\circ \cos \alpha] = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha, \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

где  $V_m$  — пиковое значение синусоидального фазового напряжения.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{ph}) \cos \alpha = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{V_l}{\sqrt{3}} \cos \alpha = \\
 &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_l \cos \alpha = 1,35 V_l \cos \alpha, \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

где  $V_l$  — линейное напряжения трехфазной сети.

#### 4.15.1. Формы токов в цепи трехфазного двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя

Обозначим токи, проходящие через тиристоры, от  $i_1$  до  $i_6$ . Каждый тиристор находится в проводящем состоянии в течение  $120^\circ$ . Формы токов тиристоров показаны на рис. 4.11ж. Следует заметить, что ток источника положителен, когда тиристоры с нечетными номерами находятся в проводящем состоянии, и ток источника отрицателен, когда тиристоры с четными номерами находятся в проводящем состоянии. На этом же рисунке показаны формы токов каждой фазы  $i_a, i_b, i_c$  источника. Видно, что формы токов в фазах источника являются  $120^\circ$ -градусными квазипрямоугольными импульсами. Таким образом, можно сделать вывод, что выпрямитель потребляет квазипрямоугольный ток от трехфазной сети.

Форма тока через тиристор показана на рис. 4.11з. Значения углов открытого тиристора находятся при этом в пределах от  $60^\circ$  до  $180^\circ$ . Среднеквадратическое значение тока через тиристор можно записать так:

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{180^\circ} I_d^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{120^\circ} I_d^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_d^2 d\theta = \frac{I_d^2}{2\pi} \left| \theta \right|_0^{2\pi/3} = \frac{I_d^2}{2\pi} \frac{2\pi}{3} = \frac{I_d^2}{3},$$

$$I_d = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \quad (4.16)$$

#### Среднеквадратическое значение тока фазы источника в трехфазном двухполупериодном выпрямителе

Форма тока фазы источника показана на рис. 4.11и. Среднеквадратическое значение тока фазы источника можно записать так:

$$I_{sRMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi i^2 d\theta},$$

$$I_{sRMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i^2 d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{30^\circ}^{150^\circ} I_d^2 d\theta = \frac{I_d^2}{\pi} \int_0^{120^\circ} d\theta =$$

$$= \frac{I_d^2}{\pi} \int_0^{2\pi/3} d\theta = \frac{I_d^2}{3} \left| \theta \right|_0^{2\pi/3} = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{I_d^2}{\pi};$$

$$I_{sRMS}^2 = \frac{2I_d^2}{3}, \quad I_{sRMS} = \sqrt{2/3} I_d. \quad (4.17)$$

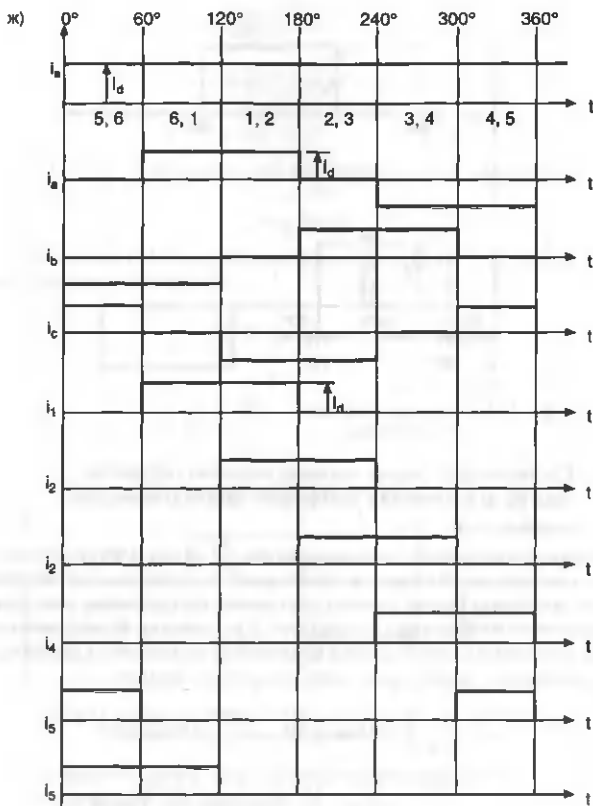


Рис. 4.11. ж) Формы токов

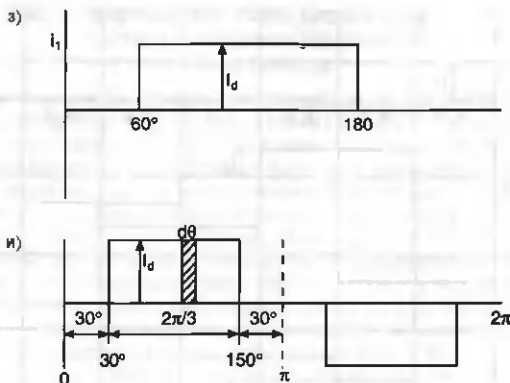


Рис. 4.11. а) Ток через тиристор;  
б) Ток источника

### Среднеквадратическое значение основной гармоники тока фазы источника в трехфазном двухполупериодном выпрямителе

Форма тока источника, показанная на рис. 4.11 б, имеет четную зеркальную симметрию. Площади положительной и отрицательной областей тока источника равны, поэтому постоянная составляющая тока, потребляемого от источника, отсутствует. В разложении Фурье для такой формы сигнала синусоидальные компоненты отсутствуют. Косинусные компоненты  $a_n$  можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{\pi/4} \int_0^{\pi/2} f(\theta) \cos n\theta d\theta; a_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{60^\circ} f(\theta) \cos \theta d\theta = \\
 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/3} I_d \cos \theta d\theta = \frac{4I_d}{\pi} \int_0^{\pi/3} \cos \theta d\theta = \frac{4I_d}{\pi} \int_0^{\pi/3} |\sin \theta|_0^{\pi/3} = \\
 &= \frac{4I_d}{\pi} \left[ \sin \frac{\pi}{3} - \sin 0 \right] = \frac{4I_d}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2}
 \end{aligned}$$

$$a_1 = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \quad (4.18)$$

$$I_s = a_1 \sin \omega t + a_2 \sin \omega t + \dots \quad (4.19)$$

$$I_s = i_{s1} + \dots + \dots \quad (4.20)$$

Из (4.19) и (4.20) следует, что величина основной гармоники тока фазы будет:

$$i_{s1} = a_1 \sin \omega t.$$

Подставляя (4.18), получаем среднеквадратическое значение основной гармоники тока фазы:

$$i_{s1} = \left( \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \right) \sin \omega t, I_{s1RMS} = \frac{a_1}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi\sqrt{2}}$$

$$I_{s1RMS} = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}. \quad (4.21)$$

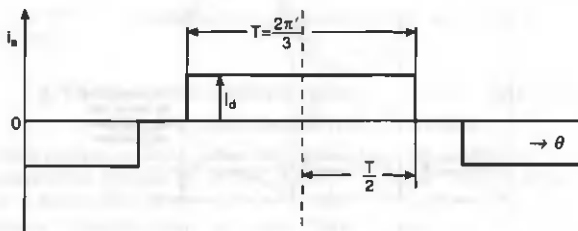


Рис. 4.11. к) Среднеквадратическое значение тока тиристора в трехфазном двухполупериодном управляемом выпрямителе

### Соотношение между углом коэффициента мощности и углом включения тиристора

Выпрямитель преобразует мощность переменного тока в мощность постоянного тока. Мощность, потребляемая выпрямителем от трехфазного источника переменного тока, равна выходной мощности постоянного тока, если пренебречь потерями при преобразовании.

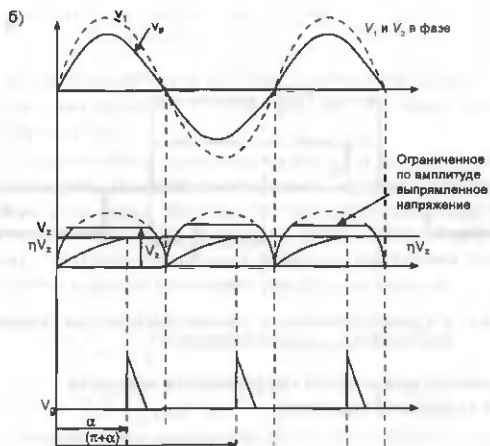


Рис. 4.12. а) Синхронизация цепи запуска с помощью однопереходного транзистора,  
б) Формы сигналов



Во всех схемах основная гармоника переменного тока источника питания преобразуется в полезную выходную мощность. Высшие гармоники вызывают дополнительные потери, в основном в виде тепла. Поэтому:

Мощность переменного тока на основной гармонике = Мощность постоянного тока

$$3V_{\text{RMS}} I_{\text{slRMS}} \cos \varphi = V_d I_d$$

$$3V_{\text{RMS}} \left( \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \right) \cos \varphi = \left( \frac{3\sqrt{3}V_m \cos \alpha}{\pi} \right) I_d$$

$$V_{\text{RMS}} \sqrt{6} \cos \varphi = \sqrt{3} V_m \cos \alpha$$

$$V_{\text{RMS}} \sqrt{6} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} V_{\text{RMS}} \cos \alpha$$

$$\cos \varphi = \cos \alpha; \varphi = \alpha. \quad (4.22)$$

То есть угол коэффициента мощности  $\varphi$  равен углу включения тиристора  $\alpha$ .

#### 4.16. Синхронизация цепи запуска с помощью однопереходного транзистора

Схема синхронизации цепи запуска с помощью однопереходного транзистора приведена на рис. 4.12а. Импульсы запуска тиристоров в фазоуправляемых выпрямителях должны быть синхронизированы с напряжением питания. Синхронизация осуществляется привязкой задержки угла включения тиристора к нулевому уровню напряжения питания. Это достигается питанием цепи управления от отдельного трансформатора. Низкое переменное напряжение  $V_s$  синхронизирующего трансформатора преобразуется в выпрямленное с помощью двухполупериодного диодного мостового выпрямителя. Сопротивление  $R_2$  и полупроводниковый стабилитрон ограничивают выпрямленное напряжение по амплитуде. Когда напряжение на конденсаторе меньше порога включения, однопереходный транзистор находится в выключенном состоянии. Напряжение на конденсаторе

экспоненциально растет и достигает порога включения, однопериодный транзистор включается. Конденсатор разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора. Импульсный трансформатор имеет две вторичные обмотки. Каждая из них подключена к управляющему электроду и катоду тиристоров. В течение положительного полупериода запускающий импульс подается на оба тиристора, но только тиристор  $T_1$  оказывается смещенным в прямом направлении и переходит во включенное состояние. Соответственно, в течение отрицательного полупериода во включенное состояние переходит тиристор  $T_2$ . Таким образом цепь генерирует последовательность синхронизированных импульсов, требуемых для управления выпрямителем.

#### 4.17. Управляющая схема для трехфазного выпрямителя

Блок-схема управления для трехфазного выпрямителя изображена на рис. 4.13а. Линейное напряжение трехфазного источника  $V_{RY}$  подается на синхронизирующий трансформатор. Выходное напряжение трансформатора управляет детектором нулевого уровня. Выходное напряжение детектора нулевого уровня высокое в течение первого полупериода и низкое в течение второго полупериода. Сформированное детектором нулевого уровня напряжение поступает на вход С генератора пилообразного напряжения 1. К выходу генератора пилообразного напряжения подключен компаратор напряжения с регулируемым порогом срабатывания. Управление порогом срабатывания компаратора осуществляется внешним напряжением  $V_c$ . Выходное напряжение компаратора низкое, пока пилообразное напряжение ниже напряжения  $V_c$ . При увеличении пилообразного напряжения выше напряжения  $V_c$  на выходе компаратора формируется высокий уровень напряжения  $V_{g1}$  и тиристор  $T_1$  переходит в открытое состояние.

Инвертированное выходное напряжение детектора нулевого уровня подается на вход генератора пилообразного напряжения 2 с компаратором, и таким же образом формируется управляющее напряжение  $V_{g4}$  для запуска тиристора  $T_4$ .

Схемы управления для второй и третьей групп тиристоров аналогичны описанной выше. Из графиков, приведенных на рис. 4.13б, видно, что время задержки угла включения тиристоров может управляться за счет изменения напряжения  $V_c$ .

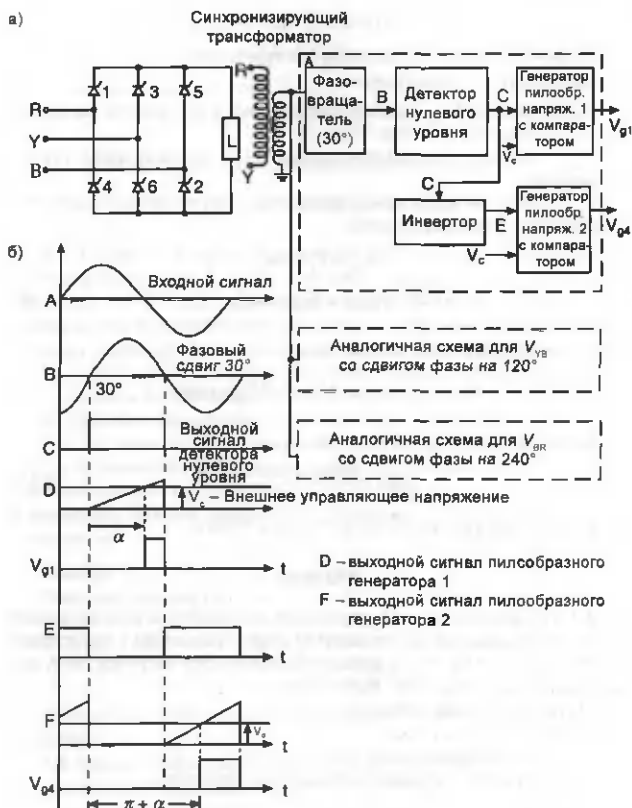


Рис. 4.13. а) Блок-схема управления для трехфазного выпрямителя  
б) Формы сигналов

## Список формул

### Формулы для трехфазного двухполупериодного выпрямителя с перекрытием

Допустим, что  $\Delta V$  — падение напряжения в трехфазном выпрямителе вследствие перекрытия;

$V_{du}$  — выходное напряжение трехфазного выпрямителя с учетом перекрытия;

$V_d$  — выходное напряжение трехфазного двухполупериодного выпрямителя без учета перекрытия.

$$V_{du} = V_d - \Delta V$$

$$V_{du} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} [\cos \alpha + \cos(\alpha + u)], \quad (4.23)$$

где  $u$  — угол перекрытия. Если  $u = 0$ , то:

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha; \quad V_d = (3\sqrt{3}V_m/p) \cos \alpha.$$

С учетом перекрытия получаем:

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + u)}{2}, \quad (4.24)$$

где  $u$  — угол перекрытия. Когда  $u = 0$ ,  $\cos \varphi = \cos \alpha$ .

## Задачи

**4.1.** Трехфазный двухполупериодный выпрямитель, подключенный ко вторичной обмотке трехфазного  $\Delta/Y$  трансформатора с характеристиками: 6,6 кВ/415 В, 50 Гц должен обеспечить ток нагрузки 200 А при напряжении питания 460 В. Вычислить:

- 1) угол включения тиристорov  $\alpha$ ;
- 2) мощность в нагрузке;
- 3) линейный переменный ток;
- 4) среднеквадратическое значение тока тиристора.

**Решение**

- 1) Угол включения тиристорov:

$$V_o = 1,35 V_l \cos \alpha; \quad 460 = 1,35 \cdot 415 \cdot \cos \alpha,$$

$$\cos \alpha = 0,82, \quad \alpha = 34,9^\circ.$$

2) Мощность в нагрузке:

$$P_o = V_o I_d = 460 \cdot 200 = 92 \text{ кВт.}$$

3) Линейный переменный ток:

$$I = \sqrt{2/3} I_d = \sqrt{2/3} \cdot 200 = 163,3 \text{ А}$$

4) Среднеквадратическое значение тока тиристора:

$$I_{aRMS} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 200/\sqrt{3} = 173,2 \text{ А.}$$

**4.2.** Трехфазный двухполупериодный выпрямитель питается от входного напряжения 415 В, 50 Гц. Его выходное постоянное напряжение величиной 440 В подается на якорь электродвигателя с параллельным возбуждением. В режиме рекуперативного торможения на якоре двигателя за счет самоиндукции вырабатывается напряжение 420 В. Вычислите необходимый угол  $\alpha$ , чтобы ограничить регенеративный электрический ток значением 4,5 А. Эффективное сопротивление цепи составляет 0,7 Ом. Прочими падениями напряжения можно пренебречь.

При рекуперативном торможении полярность напряжения на якоре двигателя меняется на обратную, поскольку изменяется направление передачи мощности. При этом направление тока в схеме остается неизменным, так как включенный тиристор проводит ток в том же направлении.

*Решение*

Согласно теореме Кирхгофа:

$$V_o = -E + I_a R_a; 1,35 \cdot V_L \cos \alpha = -E + I_a R_a,$$

$$1,35 \cdot 415 \cdot \cos \alpha = -420 + 45 \cdot 0,7; \alpha = 133,9^\circ.$$

Угол  $\alpha$  больше  $90^\circ$ , следовательно, выпрямитель работает в режиме инвертора.

**4.3.** Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель с входным переменным напряжением 230 В работает на нагрузку, состоящую из последовательно соединенных  $R$  и  $L$ . Для  $R \approx 0,1$  Ом и номинального тока нагрузки  $I = 25$  А вычислить:

1) угол  $\alpha$ , если  $E = 120$  В;

2) угол  $\alpha$ , если  $E = -120$  В.

При расчетах считать, что проводимость в цепи непрерывная.

## Решение

1) Согласно теореме Кирхгофа:

$$V_o - I_a R_a - E = 0; \quad V_o = E + I_a R_a; \quad \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha = E + I_a R_a,$$

$$\frac{2\sqrt{2} \cdot 230}{\pi} \cos \alpha = 120 + (25 \cdot 0,1); \quad \alpha = 53,7^\circ.$$

$$2) \quad V_o = -E + I_a R_a,$$

$$\frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha = -E + I_a R_a; \quad \frac{2\sqrt{2} \cdot 230}{\pi} \cos \alpha = -120 + (25 \cdot 0,1),$$

$$\alpha = 124,6^\circ.$$

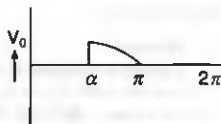
**4.4.** Выведите выражение для вычисления коэффициента пульсации однополупериодного выпрямителя, питающего резистивную нагрузку.

## Решение

$$\text{Коэффициент пульсации (r)} = \frac{\text{Величина переменной составляющей выходного напряжения}}{\text{Среднее выходное напряжение}}$$

$$r = \frac{\sqrt{V_{\text{RMS}}^2 - V_o^2}}{V_o} = \sqrt{\left(\frac{V_R}{V_o}\right)^2 - 1};$$

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos \alpha];$$



$$V_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_\alpha^\pi V^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_\alpha^\pi V_m^2 \sin^2 \theta d\theta =$$

$$= \frac{V_m^2}{2\pi} \int_\alpha^\pi \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{4V_m^2}{2\pi} \left[ \int_\alpha^\pi d\theta - \int_\alpha^\pi \cos 2\theta d\theta \right] =$$

$$= \frac{V_m^2}{2\pi} \left[ (\pi - \alpha) - \left| \frac{\sin 2\theta}{2} \right|_\alpha^\pi \right] = \frac{V_m^2}{2\pi} \left[ (\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right].$$

Следовательно:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \left[ \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right]^{1/2}; \quad r = \sqrt{\frac{V_R^2}{V_0^2} - 1}.$$

Окончательно для коэффициента пульсаций можно записать:

$$r = \sqrt{\frac{\frac{V_m^2}{4\pi} (\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2}}{\frac{V_m^2}{4\pi^2} (1 + \cos \alpha)^2} - 1};$$

$$r = \sqrt{\frac{\pi \left[ \pi - \alpha + \left( \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]}{(1 + \cos \alpha)^2} - 1}.$$

**4.5.** Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель с входным напряжением 230 В питает активную нагрузку с сопротивлением 20 Ом. Вычислите мощность, выделяемую в нагрузке, если угол включения тиристоров равен  $45^\circ$ .

*Решение*

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}; \quad V_{rms}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V^2 d\theta;$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} \left[ (\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right]^{1/2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \left[ \pi - \frac{\pi}{4} \right] + \frac{\sin 90}{2} \right\}^{1/2} \approx 126 \text{ В}.$$

$$P = \frac{V_R^2}{R} = \frac{126^2}{20} \approx 793,8 \text{ Вт}.$$

**4.6.** Вычислите максимальное среднее выходное напряжение трехфазного однополупериодного выпрямителя. Выпрямитель питается от сети переменного тока напряжением 400 В.

*Решение*

$$V_0 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos \alpha = \frac{1,35V_1 \cos \alpha}{2}.$$

Если  $\alpha = 0$ ,  $V_0$  — максимально, поэтому:

$$V_0 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} (1,35/2)V_1 = \frac{1,35}{2} \cdot 400 = 270 \text{ В}.$$



**4.7.** Трехфазный двухполупериодный выпрямитель питается от входного напряжения 400 В, 50 Гц, угол включения тиристорov составляет  $45^\circ$ . Величина тока нагрузки поддерживается на постоянном уровне 10 А и выходное напряжение на постоянном уровне 360 В. Вычислите индуктивность источника и угол перекрытия.

*Решение*

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314;$$

$$V_{du} = 1,35 V_1 \cos \alpha - \frac{3I_0 X_L}{\pi};$$

$$360 = 1,35 \cdot 400 \cos 45^\circ - \frac{3 \cdot 10 \cdot \omega L}{\pi}.$$

Отсюда получаем  $L = 7,38$  мГн.

Используя (4.23), получаем:

$$360 = \frac{3\sqrt{3} \left( \frac{400\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right)}{2\pi} [\cos 45^\circ + \cos(45^\circ + u)];$$

$$u = 6,3^\circ;$$

$$R_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{360}{10} = 36 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha + [\cos(\alpha + u)]}{2};$$

$$\cos \varphi = \frac{\cos 45^\circ + \cos(45^\circ + 6,3^\circ)}{2} = 0,199.$$

**4.8.** Для выпрямления переменного напряжения используется трехфазная двухполупериодная мостовая схема. Индуктивность рассеяния каждой фазы катушки трансформатора 2 мГн. Трехфазное входное напряжение составляет 400 В при частоте 50 Гц. Постоянный ток нагрузки составляет 15 А.

Вычислить:

а) падение выходного напряжения нагрузки, вызванное индуктивной компонентой источника;

б) угол включения тиристорov, необходимый для получения постоянного выходного напряжения 200 В.



**Решение**

$$a) \quad \Delta V = 3I_0 X / \pi = 3 \cdot 15 \cdot 314 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / \pi;$$

$$\Delta V = 9 \text{ В}$$

$$b) \quad V_{du} = V_d - \Delta V = 1,35 V_i \cos \alpha - \Delta V;$$

$$200 = 1,35 \cdot 400 \cos \alpha - 9.$$

$$\alpha = 67,6^\circ.$$

**Вопросы и ответы**

1. Наличие индуктивности источника в управляемом выпрямителе должно уменьшить выходное напряжение. Да или нет?

2. В однофазном мостовом выпрямителе, работающем на активную нагрузку, пиковое обратное напряжение равно пиковому напряжению источника питания. Да или нет?

3. Может ли фазоуправляемый выпрямитель работать как инвертор, если угол включения тиристорov находится в диапазоне  $90^\circ \dots 180^\circ$ ?

4. В полумостовом выпрямителе мощность источника передается в нагрузку. Да или нет?

5. Коэффициент пульсации двухполупериодного выпрямителя с отводом от центральной точки обмотки трансформатора равен 0,482. Да или нет?

6. Для того же самого среднего выходного напряжения номинальное значение импульсного обратного напряжения тиристорov будет большим, чем у однофазных двухполупериодных выпрямителей с отводом от центральной точки обмотки трансформатора. Да или нет?

7. Секционированная вторичная обмотка силового трансформатора предохраняет от подмагничивания сердечника постоянным током. Да или нет?

8. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель, работающий в режиме заряда аккумуляторной батареи от сети переменного тока, может передавать мощность от батареи обратно в сеть, если угол включения тиристорov находится в диапазоне от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ . Да или нет?

9. Способствует ли демпфирующий диод процессу переключения тиристорov в случае индуктивной нагрузки?

**10.** Генерация запускающих импульсов с помощью внешней цепи является, по существу, управлением выпрямителем без обратной связи. Да или нет?

**11.** Может ли двухполупериодный выпрямитель работать как управляемый выпрямитель и как инвертор?

**12.** Возможен ли удовлетворительный запуск тиристора при помощи одностабильного мультивибратора в случае резистивно-индуктивной цепи?

**13.** Показания амперметра переменного тока, подключенного к однополупериодному управляемому выпрямителю с углом управления  $\alpha = 0^\circ$  будут равны:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I^2 d\theta} = \frac{I_m}{2}.$$

Да или нет?

**14.** В цепи управляющего электрода тиристора применяется импульсный трансформатор, чтобы обеспечить изоляцию между цепью управления и силовыми цепями. Да или нет?

**15.** Что такое ложный запуск?

*Ответ.* Последовательность включения тириستоров в однофазном выпрямителе 1—2, 3—4, 1—2, 3—4 а в трехфазном выпрямителе 1—2, 2—3, 3—4, 5—6, 6—1. Любая другая последовательность включения тиристоров помимо этих называется ложным запуском.

**16.** Почему импульсное включение тиристоров предпочтительней? Когда этот режим запуска не работает?

*Ответ.* В режиме импульсного запуска существенно уменьшаются потери в цепи управляющего электрода тиристора. Отсутствует насыщение сердечника импульсного трансформатора. В случае неисправности цепи управления, тиристор остается в выключенном состоянии.

**17.** Какова функция компаратора нулевого уровня в цепи управления?

*Ответ.* Преобразование синусоидального входного напряжения в прямоугольное.

**18.** От какой точки измеряется задержка угла включения в трехфазных выпрямителях?

*Ответ.* От естественной точки переключения, значение угла которой  $30^\circ$  после пересечения нулевого уровня фазовых напряжений.

**19.** Двухполупериодный выпрямитель является источником питания для двигателя постоянного тока. Каковы в этом случае условия регенерации мощности?

*Ответ*

1.  $\alpha > 90^\circ$ .

2. Полярность напряжения якоря двигателя должна быть обратной.

3. Источник питания переменного тока должен иметь возможность поглощать мощность.

**20.** Каковы преимущества демпфирующего диода?

*Ответ*

1. Улучшается коэффициент мощности.

2. Увеличивается среднее выходное напряжение.

**21.** Почему в однополупериодном выпрямителе невозможна регенерация?

*Ответ.* Полярность выходного постоянного напряжения и тока не может быть реверсирована, поэтому регенерация невозможна.

**22.** Почему теоретически демпферный диод не требуется для полумостового выпрямителя?

*Ответ.* Демпферный диод не требуется, так как полумостовой выпрямитель сам обладает режимом демпфирования нагрузки.

**23.** Каково следствие явления перекрытия?

*Ответ*

1. Снижается коэффициент мощности.

2. Снижается среднее выходное напряжение.

**24.** Какова частота пульсаций на выходе:

а) однофазного однополупериодного выпрямителя;

б) трехфазного однополупериодного выпрямителя;

в) трехфазного двухполупериодного выпрямителя?

*Ответ*

а)  $2f$ ;

б)  $3f$ ;

в)  $6f$ .

$f$  — частота напряжения источника питания.

## ГЛАВА 5

# КОММУТАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 5.1. Введение

Во многих случаях возникает необходимость регулирования величины постоянного напряжения. В цепях переменного тока эту задачу очень эффективно выполняют трансформаторы. У делителей напряжения и двигателей-генераторов постоянного тока весьма низок коэффициент полезного действия. Коммутаторы постоянного тока позволяют с очень высокой эффективностью повышать или понижать постоянное напряжение.

### 5.2. Общие положения

Основным принципом получения регулируемого постоянного напряжения из исходного фиксированного постоянного напряжения является применение коммутирующего элемента, как изображено на рис. 5.1а. Здесь  $S$  — механический коммутатор, который периодически размыкается и замыкается (на практике в качестве коммутатора применяются мощные быстродействующие полупроводниковые приборы). Когда коммутатор замкнут, нагрузка подключена к источнику питания с постоянным напряжением, и напряжение на нагрузке равняется  $U_s$ . Коммутатор сохраняет замкнутое состояние в течение периода времени  $t_{\text{он}}$ . Затем коммутатор размыкается и остается разомкнутым в течение периода  $t_{\text{оф}}$ . В это время нагрузка отключена от источника постоянного напряжения  $U_s$ , и напряжение на нагрузке равно нулю. Форма постоянного напряжения, модулированного таким образом, изображена

на рис. 5.1б. Отсюда видно, что среднее значение постоянного напряжения на нагрузке можно вычислить следующим образом:

$$V_{av} = \frac{V_s \cdot t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{V_s \cdot t_{on}}{T} = V_s t_{on} f = V_s \delta,$$

$$V_{av} = V_s \delta, \quad (5.1)$$

где  $\delta = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f$ .

Параметр  $\delta$  называется рабочим циклом или скважностью коммутирования,  $t_{on}$  — время включенного состояния коммутатора и  $f$  — рабочая частота коммутатора.

Следует заметить, что по этой схеме выходное напряжение получается путем коммутации входного напряжения. Относительная величина времени коммутации меняется в диапазоне от нуля до единицы, соответственно, среднее выходное напряжение изменяет свою величину от нуля до  $V_s$ . Выходное напряжение в такой схеме всегда меньше, чем входное напряжение, то есть устройство является понижающим преобразователем.

а) Фиксированное постоянное напряжение → Коммутатор → Модулированное постоянное напряжение

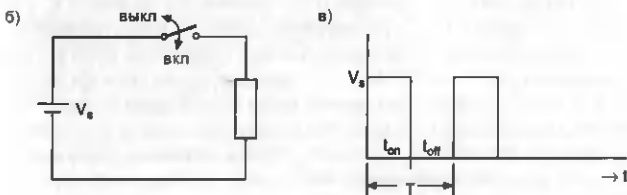


Рис. 5.1. Основной принцип действия коммутатора постоянного напряжения:

- а) Блок-схема коммутатора;
- б) Электрическая схема;
- в) Форма модулированного постоянного напряжения

### 5.3. Способы управления коммутаторами

Сквозностью коммутирования, как показано на рис. 5.2, можно управлять следующими методами:

- а) изменением времени включенного состояния при постоянной частоте коммутации;
- б) изменением частоты коммутации при постоянном времени включенного состояния.

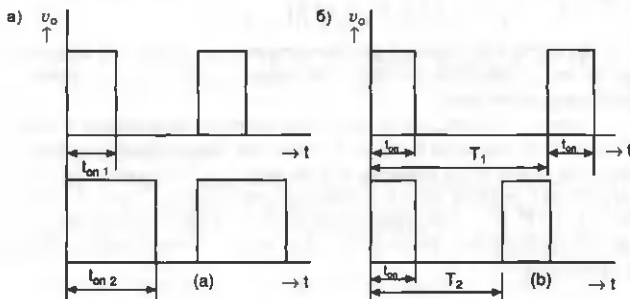


Рис. 5.2. Формы выходных напряжений для двух способов управления коммутатором:

- а) при постоянной частоте управления;
- б) при переменной частоте управления

В уравнениях (5.1) применены две переменные величины  $t_{on}$  и  $f$ , с помощью которых можно регулировать сквозность коммутирования  $\delta$  и тем самым управлять величиной выходного напряжения. Одна из этих переменных может изменяться, в то время как другая остается постоянной. В случае переменной частоты время включенного состояния  $t_{on}$  остается постоянным, если же частота коммутации остается постоянной,  $t_{on}$  является переменной величиной. Формы выходных напряжений для этих способов управления коммутатором изображены на рис. 5.2. Частота коммутации в большинстве случаев находится в диапазоне от 300 Гц до 100 кГц. Чем выше частота, тем меньше габариты элементов фильтра и тем меньше время установления. Преимущество постоянной частоты коммутации состоит в том, что существенно упрощается конструкция фильтра.

Среднеквадратическое выходное напряжение:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_s^2 \cdot t_{on}}{T}} = V_s \sqrt{\delta}.$$

Среднеквадратический ток нагрузки:

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_s \sqrt{\delta}}{R}.$$

Полная выходная мощность:

$$P_t = V_{rms} \cdot I_{rms} = \frac{V_s \sqrt{\delta} \cdot V_s \sqrt{\delta}}{R}.$$

$$P_t = \frac{V_s^2 \delta}{R}.$$

Средняя выходная мощность:

$$P_{av} = V_s I_{av} = V_s \frac{V_{av}}{R}$$

$$\text{где } I_{av} = \frac{V_s \delta}{R} \text{ и } P_{av} = \frac{V_s^2 \delta}{R}.$$

## 5.4. Классификация коммутаторов

На практике вместо механических коммутаторов используются переключающие твердотельные приборы, такие как мощные транзисторы, тиристоры или запираемые тиристоры. Из вышеупомянутых приборов тиристор является самым популярным для применения в высоковольтных силовых коммутаторах.

Такие коммутаторы в основном используются для того чтобы регулировать скорость вращения электродвигателей постоянного тока. Тиристор может быть включен в различных местах электрической цепи электродвигателя. В частности, коммутатор может работать в режиме изменения полярности напряжения и тока нагрузки (реверсирование направления вращения электродвигателя), то есть работать в различных квадрантах на  $V-I$ -характеристике. Кроме того, электродвигатель может работать в режиме потребления мощности от источника питания или работать в режиме генератора, передавая мощность обратно

в источник питания. В зависимости от режима работы можно классифицировать коммутаторы как квадрантные или работающие в режиме потребления или генерации мощности. Коммутатору необходима цепь управления, поскольку входное напряжение постоянное. Коммутаторы также можно классифицировать в зависимости от структуры цепи управления. Часто коммутаторы просто делятся на такие типы как тип А, тип В и т. д.

### Коммутатор типа А

На рис. 5.3а изображен коммутатор с тиристором  $T_1$ , соединенным последовательно с электромотором. Когда тиристор  $T_1$  находится во включенном состоянии, ток протекает от источника питания к электромотору. При этом напряжение на электромоторе равно напряжению источника питания. Когда тиристор  $T_1$  выключен, ток электромотора протекает через диод и напряжение на электромоторе падает до нуля. В этом случае во включенном и в выключенном состояниях тиристора ток электромотора сохраняет направление, но напряжение на нем изменяется от максимального значения до нуля. Рабочая область коммутатора находится в первом квадранте  $V$ - $I$ -характеристики. Этот тип коммутатора называется коммутатором типа А.

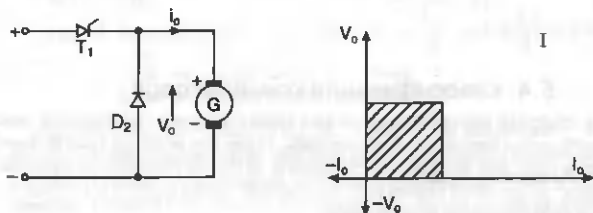


Рис. 5.3а. Коммутатор типа А

### Коммутатор типа В

На рис. 5.3б изображен коммутатор с тиристором  $T_2$ , соединенным параллельно с электромотором. Когда тиристор  $T_2$  находится во включенном состоянии, весь ток электромотора протекает через него и напряжение на электромоторе равно нулю.

Следует заметить, что через электромотор протекает ток противоположной полярности по сравнению с током, показанным на рис. 5.3а.



Когда тиристор  $T_2$  выключен, напряжение на электромоторе равно напряжению источника питания и его ток протекает через диод  $D_1$  обратно в источник питания. Рабочая область коммутатора находится во втором квадранте  $V$ - $I$ -характеристики. Такой тип коммутатора называется регенеративным коммутатором или коммутатором типа В.

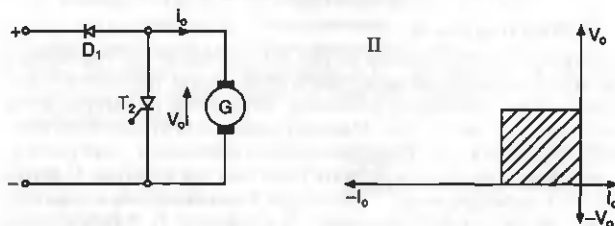


Рис. 5.36. Коммутатор типа В

### Коммутатор типа С

Коммутатор, изображенный на рис. 5.3в, содержит последовательно соединенные тиристоры  $T_1$  и  $T_2$ , подключенные параллельно источнику питания.

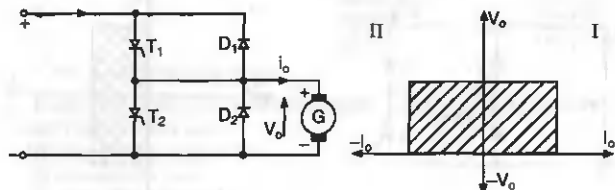


Рис. 5.3в. Коммутатор типа С

Коммутация в этой схеме происходит в дополняющем режиме. Когда тиристор  $T_1$  находится во включенном состоянии, напряжение на нагрузке равно напряжению источника питания, ток, протекающий через нагрузку, — положительный. Электродвигателю передается мощность источника. После выключения тиристора  $T_1$  через диод  $D_2$  начинает протекать обратный ток нагрузки. Появление обратного тока является следствием запасенной энергии в индуктивности обмоток электродвигателя. После того как обратный ток упал до нуля, включается тиристор  $T_2$ .

При этом напряжение на нагрузке по-прежнему сохраняется на нуле, в то время как ток нагрузки меняет направление. В этом режиме электродвигатель работает как генератор. Рабочая область такого коммутатора находится в первом и втором квадранте  $V$ - $I$ -характеристики. Этот тип коммутатора называется коммутатором типа С.

### Коммутатор типа D

Коммутатор, изображенный на рис. 5.3г, содержит два тиристора и два диода, включенных по мостовой схеме. Когда тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  находятся во включенном состоянии, напряжение на нагрузке и ток нагрузки — положительные. Мощность передается от источника питания электродвигателю. После выключения тиристора  $T_2$ , через диод  $D_1$  и тиристор  $T_1$  начинает протекать обратный ток нагрузки. С другой стороны, когда тиристор  $T_1$  находится в выключенном состоянии, обратный ток протекает через диод  $D_2$  и тиристор  $T_2$ . В любом случае во время обратного хода напряжение на нагрузке равно нулю и ток нагрузки положителен. Когда тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  одновременно выключены, напряжение на нагрузке отрицательное, и мощность передается от нагрузки к источнику питания. Этот тип коммутатора называется коммутатором типа D.

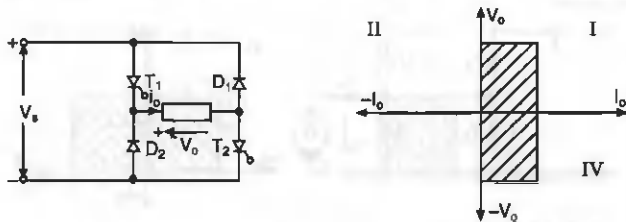


Рис. 5.3г. Коммутатор типа D

### Коммутатор типа E

Коммутатор, изображенный на рис. 5.3д, является четырехквадрантным коммутатором. В первом квадранте тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  находятся в проводящем состоянии.  $V_0$  и  $I_0$  — положительные. Следовательно, мощность источника передается в нагрузку. Если электродвижущая сила электромотора больше, чем напряжение источника питания, диоды  $D_1$  и  $D_2$  смещаются в прямом направлении и мощность передается

от нагрузки к источнику питания. При этом  $V_0$  — положительное, а  $I_0$  — отрицательное, коммутатор работает во втором квадранте. Если тиристоры  $T_3$  и  $T_4$  находятся в проводящем состоянии, напряжение  $V_0$  и ток  $I_0$  — отрицательные. При этом электродвигатель потребляет энергию от источника питания и работает в реверсивном режиме. Коммутатор работает в третьем квадранте. Если электродвижущая сила электродвигателя больше, чем напряжение источника питания, диоды  $D_3$  и  $D_4$  смещаются в прямом направлении и мощность передается от нагрузки к источнику питания. При этом  $V_0$  — отрицательное, а  $I_0$  — положительное, коммутатор работает в четвертом квадранте. Этот тип коммутатора называется коммутатором типа Е.

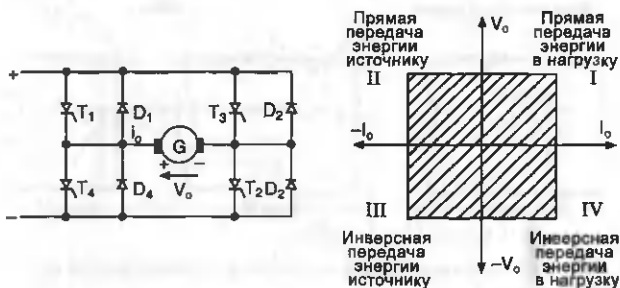


Рис. 5.3д. Коммутатор типа Е

В следующих разделах рассматриваются четыре типа понижающих коммутаторов, таких как:

- 1) коммутатор напряжения;
- 2) коммутатор тока;
- 3) коммутатор нагрузки;
- 4) коммутатор Джонса.

## 5.5. Коммутатор напряжения

Для коммутирования напряжения используется коммутатор типа Д. Электрическая схема и режимы работы коммутатора напряжения изображены на рис. 5.4. Так как на выходе коммутатора напряжения включена нагрузка с большой индуктивностью, в цепи нагрузки обеспечивается практически постоянный ток. В начальный момент времени

конденсатор  $C$  предварительно заряжается до напряжения источника питания  $E$  через ключ.

Принцип действия схемы можно объяснить, рассмотрев четыре фазы ее работы.

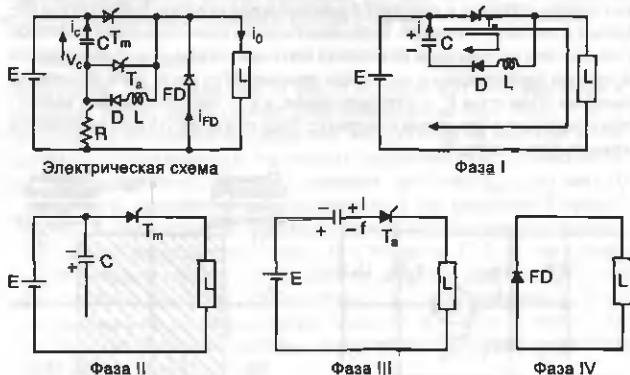


Рис. 5.4а. Коммутатор напряжения

**Фаза I.** Коммутатор напряжения включается после запуска основного тиристора  $T_m$ .

В замкнутой цепи начинают протекать два тока. Ток нагрузки протекает через основной тиристор  $T_m$  и нагрузку, а ток заряженного конденсатора  $C$  через  $T_m$ — $L$ — $D$ . Ток, протекающий через конденсатор, — синусоидальный, а напряжение на нем — косинусоидальное. Суммарный ток, протекающий через основной тиристор, представляет собой сумму постоянного тока нагрузки и синусоидального тока конденсатора.

**Фаза II.** Ток конденсатора по окончании полупериода падает до нуля. Далее ток нагрузки продолжает протекать через тиристор  $T_m$ , при этом полярность напряжения на конденсаторе изменила свой знак. Это и есть необходимая полярность напряжения для запираания тиристора  $T_m$ .

**Фаза III.** Чтобы выключить коммутатор напряжения, необходимо запереть основной тиристор. Когда тиристор  $T_a$  включается, конденсатор  $C$  подключается к тиристорам  $T_m$  и он запирается. Далее через конденсатор,

тиристор  $T_a$  и нагрузку продолжает протекать постоянный ток. Напряжение на конденсаторе линейно уменьшается до нуля.

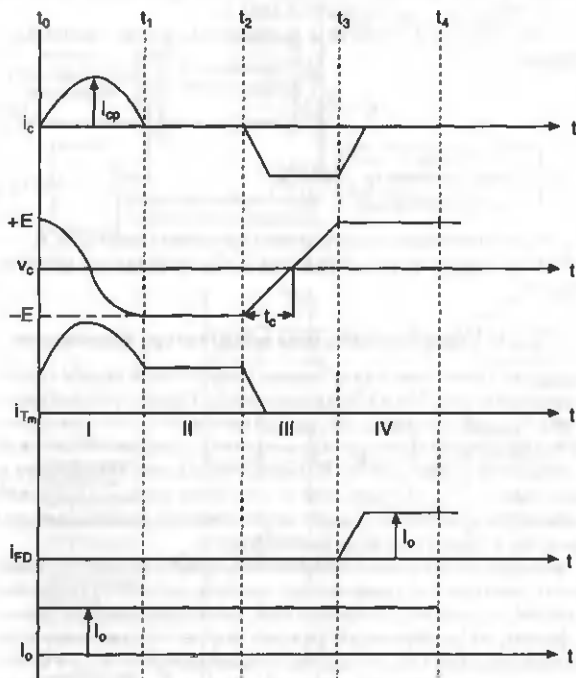


Рис. 5.46. Формы напряжений и токов в цепях коммутатора напряжения

**Фаза IV.** Обратное напряжение индуктивности нагрузки смещает демпферный диод в прямом направлении  $FD$ , при этом в нагрузке сохраняется постоянный ток. Конденсатор  $C$  продолжает заряжаться. Ток, протекающий через тиристор  $T_a$ , постепенно уменьшается, а ток, протекающий через демпферный диод  $FD$ , постепенно увеличивается таким образом, что сумма этих токов равна постоянному току нагрузки.

Когда ток, протекающий через тиристор  $T_a$ , уменьшится до нуля, схема переходит в выключенное состояние. В этой фазе находится в проводящем состоянии только демпферный диод  $FD$ .

Величины индуктивности  $L$  и емкости  $C$  можно рассчитать по формулам:

$$C = \frac{2t_q I_0}{E}, \quad (5.3)$$

$$L = \frac{1,11 E^2 C}{I_0^2}, \quad (5.4)$$

где  $t_q$  — суммарное время выключенного состояния тиристоров,  $I_0$  — выходной ток коммутатора напряжения и  $E$  — напряжение источника питания.

### 5.5.1. Управляющая схема коммутатора напряжения

Блок-схема управления коммутатором напряжения и формы сигналов изображены на рис. 5.5а и 5.5б соответственно. Генератор пилообразного напряжения работает на частоте, равной выходной частоте коммутатора. Входными сигналами компаратора являются пилообразное напряжение и напряжение управления  $V_c$ . Выходное напряжение компаратора высокое, если  $V_T > V_c$ , и низкое, если  $V_T < V_c$ . Далее выходное напряжение компаратора подается на ждущие одновибраторы, срабатывающие по переднему и заднему фронтам соответственно.

Выходное напряжение одновибратора, срабатывающего по заднему фронту, поступает на управляющий электрод основного тиристора, а выходное напряжение одновибратора, срабатывающего по переднему фронту, на управляющий электрод вспомогательного тиристора. В момент времени  $t = t_0$  включается основной тиристор  $T_m$  и остается в состоянии проводимости в течение периода  $T_{on}$ . В момент времени  $t = t_1$  включается вспомогательный тиристор, за счет чего происходит выключение основного тиристора. В момент времени  $t = t_2$  снова включается основной тиристор и процесс повторяется. При увеличении управляющего напряжения время  $T_{off}$  выключенного состояния основного тиристора уменьшается и наоборот. Таким образом, среднее выходное напряжение можно регулировать, изменяя напряжение управления  $V_c$ .

а)



б)

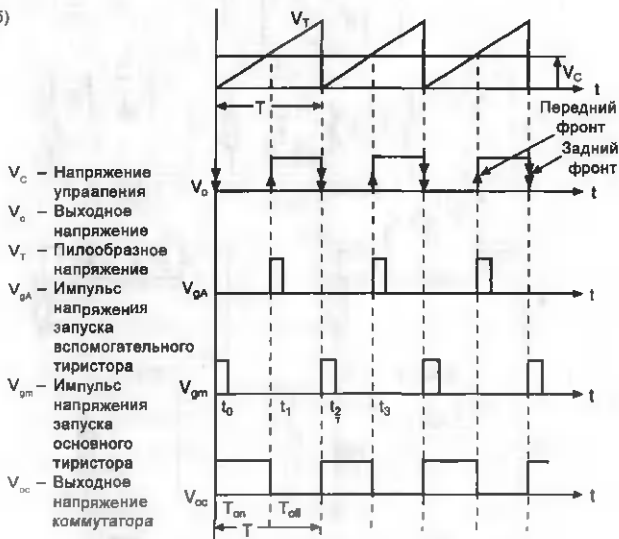


Рис. 5.5. а) Блок-схема управления коммутатором напряжения;

б) Формы сигналов

## 5.6. Коммутатор тока

Электрическая схема и режимы работы коммутатора тока изображены на рис. 5.6. В электрической цепи коммутатора тока индуктивность  $L$  подключена последовательно с конденсатором  $C$ ,  $T_m$  является основным тиристором, а  $T_a$  — вспомогательным. В начальный момент времени конденсатор  $C$  предварительно заряжается до напряжения источника питания  $E$  через ключ. Принцип действия схемы можно объяснить, рассмотрев детально фазы ее работы.

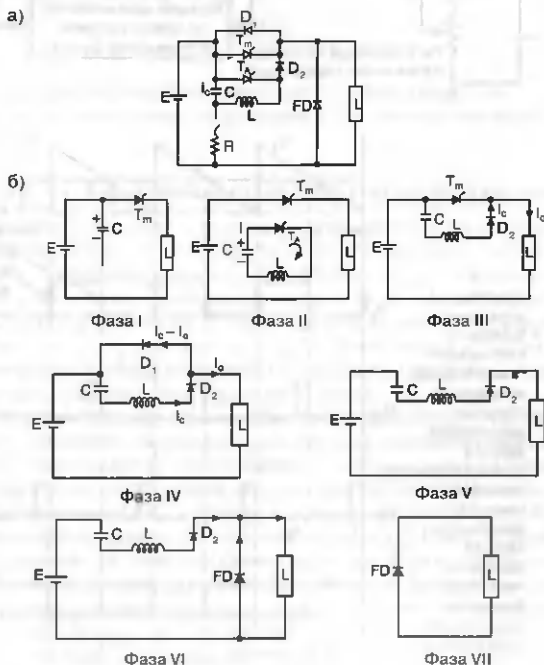


Рис. 5.6. а) Коммутатор тока;  
б) Фазы работы схемы



**Фаза I.** Коммутатор включается при включении основного тиристора  $T_m$ . Через нагрузку начинает протекать ток. Основной тиристор находится в проводящем состоянии в течение периода  $T_{on}$ .

**Фаза II.** Процесс переключения в схеме начинается с момента запуска вспомогательного тиристора  $T_a$ . В цепи начинают протекать два тока. Ток нагрузки протекает через основной тиристор  $T_m$  и нагрузку, а ток заряженного конденсатора  $C$  — через  $T_a$  и  $L$ . Ток конденсатора продолжает протекать в течение полупериода. К окончанию полупериода, когда напряжение на конденсаторе уменьшается до нуля, ток через тиристор  $T_a$  также уменьшается до нуля, и он выключается.

**Фаза III.** После выключения тиристора  $T_a$  образуется замкнутая цепь из емкости  $C$ , индуктивности  $L$ , диода  $D_2$  и тиристора  $T_m$ . Ток конденсатора теперь противоположен току нагрузки, протекающему через тиристор  $T_m$ . Суммарный ток тиристора теперь будет  $i_o - i_c$ . Следует заметить, что мгновенное значение тока  $i_c$  меньше, чем значение тока  $i_o$  в течение этой фазы. В момент времени  $t = t_2$  значения этих токов равны —  $i_o = i_c$ . Полный ток тиристора  $T_m$  становится равным нулю и выключается.

**Фаза IV.** Поскольку тиристор  $T_m$  находится в проводящем состоянии, диод  $D_1$  не может находиться в состоянии проводимости, так как он обратно смещен за счет падения напряжения на тиристоре  $T_m$ . Когда тиристор  $T_m$  выключен, диод  $D_1$  смещается в прямом направлении, и через него начинает протекать ток  $i_c - i_o$ . В момент времени  $t = t_3$  мгновенное значение протекающего через диод тока становится равным нулю, и диод  $D_1$  выключается. В течение этой фазы обратное падение напряжения на диоде  $D_1$  смещает тиристор в обратном направлении, и он остается в закрытом состоянии.

**Фаза V.** Постоянный ток от источника питания  $E$  протекает по цепи  $C-L-D_2$  и через нагрузку. После момента времени  $t_4$  этот ток начинает уменьшаться. Полярность напряжения на индуктивности нагрузки меняется, демпферный диод  $FD$  смещается в прямом направлении и переходит в проводящее состояние.

**Фаза VI.** Ток, протекающий через диод  $D_2$ , постепенно уменьшается, в то время как ток демпферного диода  $FD$  увеличивается.

**Фаза VII.** Когда ток диода  $D_2$  уменьшается до нуля, он запирается, ток нагрузки протекает только через демпферный диод  $FD$ . Если основной тиристор включается снова, вышеупомянутый процесс повторяется. Надежное переключение в этой схеме возможно, только если ток нагрузки меньше, чем пиковое значение тока конденсатора.

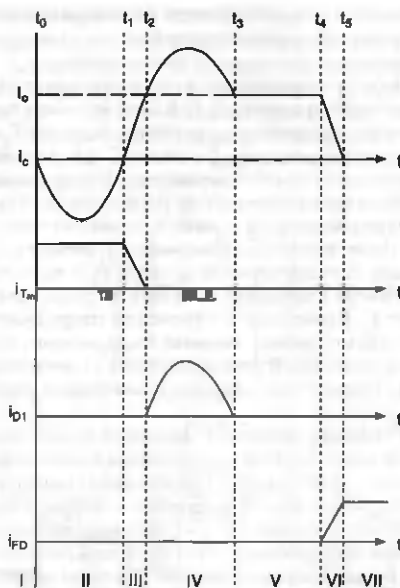


Рис. 5.6г. Формы напряжений и токов в цепях коммутатора тока

Величины индуктивности  $L$  и емкости  $C$  можно рассчитать по формулам:

$$L = \frac{V_s t_c}{x I_0 (\pi - 2\theta)}, \quad (5.5)$$

где  $x = \frac{I_{cp}}{I_0}$  и  $\theta = \sin^{-1}(1/x)$ .

$$C = \frac{x I_0 t_c}{V_s (\pi - 2\theta)}, \quad (5.6)$$

где  $t_c$  — время выключения цепи;  $I_{cp}$  — пиковое значение тока конденсатора.

## 5.7. Коммутатор нагрузки

Электрическая схема и режимы работы коммутатора нагрузки изображены на рис. 5.7. Схема коммутатора нагрузки содержит четыре тиристора. Они включаются попарно. Первоначально конденсатор заряжен, как показано на рис. 5.7;  $a-$  и  $b+$ . Принцип действия схемы можно объяснить, рассмотрев детально фазы ее работы.

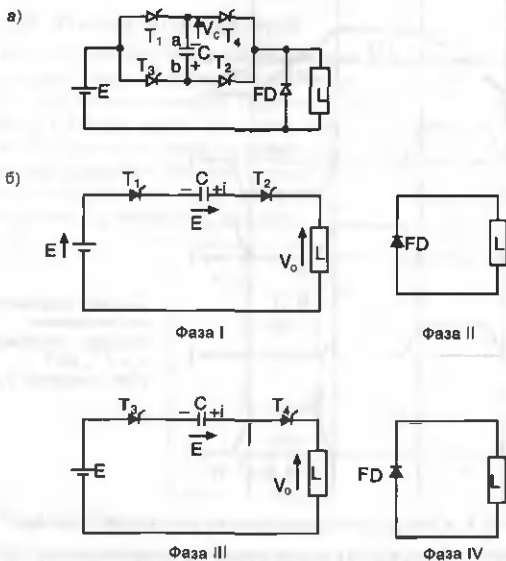
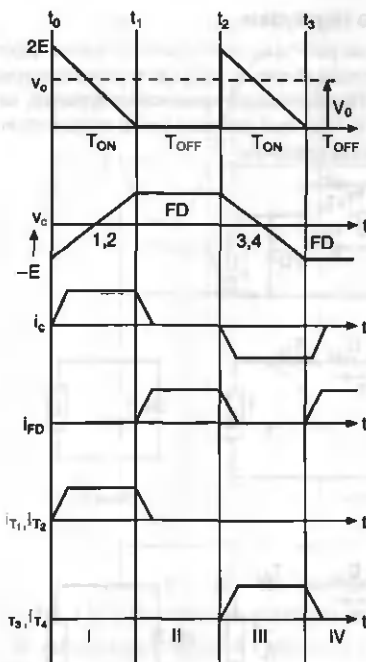


Рис. 5.7. а) Схема коммутатора нагрузки;  
б) Фазы работы схемы

**Фаза I.** Тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  включены. Постоянный ток протекает через тиристор  $T_1$ , емкость  $C$ , тиристор  $T_2$  и нагрузку. Когда через конденсатор протекает постоянный ток, напряжение на нем изменяется линейно. Напряжение на нагрузке уменьшается от  $2E$  до нуля.

Величина протекающего тока также уменьшается до нуля.



Среднее напряжение — это отношение площади треугольника  $V_o = \frac{1}{2} T_{on} 2E / T$  к его основанию  $V_o = \delta E$

Рис. 5.7в. Формы напряжений и токов в цепях коммутатора тока

**Фаза II.** Полярность напряжения на индуктивности нагрузки меняется, демпферный диод  $FD$  смещается в прямом направлении и переходит в проводящее состояние. Весь ток нагрузки протекает через демпферный диод  $FD$ .

**Фаза III.** Когда тиристоры  $T_3$  и  $T_4$  одновременно включаются, часть тока, протекающего через демпферный диод  $FD$ , начинает протекать через них. В течение этого периода ток нагрузки равен нулю.

**Фаза IV.** Полярность напряжения на индуктивности нагрузки меняется, демпферный диод  $FD$  смещается в прямом направлении и

переходит в проводящее состояние. Весь ток нагрузки протекает через демпферный диод  $FD$ . Если тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  включены снова, вышеупомянутый процесс повторяется.

Преимущество коммутирования нагрузки состоит в том, что в схеме не требуется дополнительная коммутирующая индуктивность, функции которой выполняет сама нагрузка.

### 5.8. Коммутатор Джонса

В коммутаторе Джонса не требуется резистор для предварительного заряда конденсатора. Первоначальный заряд конденсатора осуществляется через вспомогательный тиристор. Принцип действия схемы прерывателя Джонса можно объяснить, рассмотрев детально фазы ее работы. Электрическая схема и режимы работы коммутатора Джонса изображены на рис. 5.8. Эта схема похожа на схему коммутатора напряжения с тем отличием, что в ней имеется дополнительная катушка индуктивности с центральным выводом.

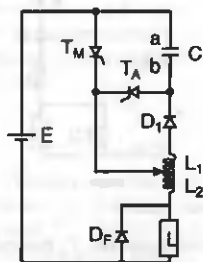


Рис. 5.8а. Схема коммутатора Джонса

**Фаза I.** После включения основного тиристора  $T_m$  в замкнутой цепи начинают протекать два тока. Ток нагрузки протекает через основной тиристор  $T_m$ , индуктивность  $L_2$  и нагрузку. Одновременно протекает ток через замкнутый контур, сформированный тиристором  $T_m$ , индуктивностью  $L_1$ , диодом  $D_1$  и емкостью  $C$ .

В течение полупериода ток в замкнутом контуре уменьшается до нуля, диод  $D_1$  запирается. Полярность напряжения на конденсаторе изменяется на обратную. В конце включенного периода коммутатора включается вспомогательный тиристор  $T_A$ . К тиристоры  $T_m$

прикладывается обратное напряжение, запасенное на конденсаторе, и он выключается.

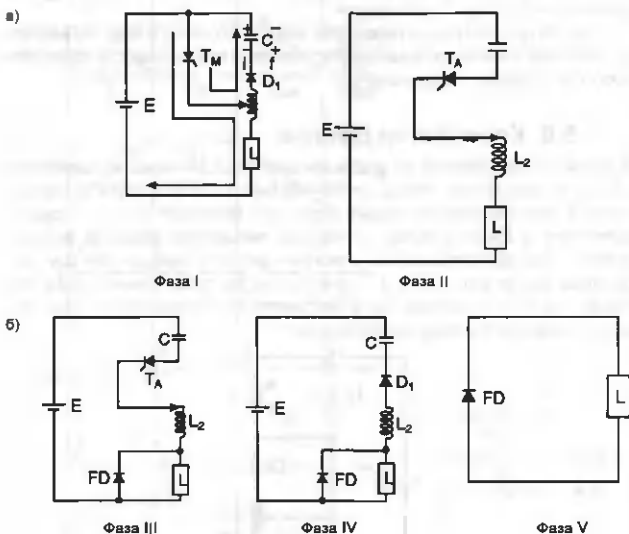


Рис. 5.86. Фазы работы схемы

**Фаза II.** После того как тиристор  $T_M$  выключился, ток продолжает протекать через емкость  $C$ , тиристор  $T_A$ , индуктивность  $L_2$  и нагрузку. Конденсатор перезаряжается через тиристор  $T_A$  и индуктивность  $L_2$ .

**Фаза III.** Напряжение на конденсаторе смещает в прямом направлении демпферный диод  $FD$ . Ток тиристора  $T_A$  уменьшается, в то время как ток демпферного диода  $FD$  увеличивается, при этом сохраняется постоянный ток нагрузки. Когда ток тиристора  $T_A$  уменьшается до нуля, он выключается.

**Фаза IV.** Когда тиристор  $T_M$  находится в проводящем состоянии, диод  $D_1$  не может находиться в состоянии проводимости, так как падение напряжения на тиристоре  $T_M$  смещает его в обратном направлении. Когда тиристор  $T_M$  выключен, конденсатор  $C$  разряжается через источник

питания  $E$ ,  $FD$ ,  $L_2$ ,  $L_1$  и  $D_1$  до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не сравняется с напряжением питания.

**Фаза V.** Ток через нагрузку сохраняется постоянным до тех пор, пока демпферный диод  $FD$  находится в проводящем состоянии. Схема находится в режиме свободного хода, так как все элементы схемы выключены.

Следует заметить, что полярность напряжения на конденсаторе в фазах IV и V такая же, как и в начальной фазе I. Если основной тиристор  $T_m$  запустить снова, вышеперечисленные процессы повторятся.

Формы напряжений и токов в цепях коммутатора Джонса подобны аналогичным в цепях коммутатора напряжения.

## 5.9. Повышающий коммутатор

Повышающий коммутатор также называется повышающим преобразователем. Форма тока повышающего коммутатора в установившемся состоянии изображена на рис. 5.9в.

В момент времени  $t = t_0$  тиристор  $T$  включается. К индуктивности  $L$  прикладывается постоянное напряжение источника питания.

Согласно теореме Кирхгофа для фазы I можно записать:

$$V_L = V_s;$$

$$V_L = V_s = L di/dt,$$

где  $V_s$  и  $L$  — константы. Поэтому производная  $di/dt$  также должна быть константой. Следовательно, ток в индуктивности  $L$  линейно увеличивается в течение периода  $T_{on}$ . После выключения тиристора схема находится в фазе II. В течение этого времени энергия, запасенная в индуктивности  $L$ , передается в нагрузку. Следующие рассуждения основаны на таких положениях.

1) Примем, что ток в цепи постоянный, и его колебания пренебрежимо малы.

2) Энергия, запасенная в индуктивности в течение включенного состояния, равна энергии, отдаваемой в нагрузку в течение выключенного состояния.

Положим, что  $W_{on}$  и  $W_{off}$  являются энергиями соответственно включенного и выключенного периода.

$$W_{on} = V_s I t_{on} \quad (5.8)$$

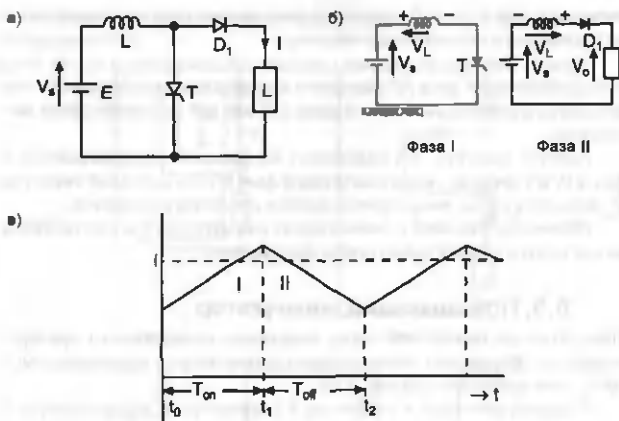


Рис. 5.9. а) Схема повышающего коммутатора;  
 б) Фазы работы схемы;  
 в) Форма тока

Согласно теореме Кирхгофа для фазы II можно записать:

$$V_s + V_L - V_o = 0;$$

$$V_L = (V_o - V_s).$$

Поэтому:

$$W_{off} = (V_o - V_s) I t_{on}, \quad (5.9)$$

Приравняем (5.8) и (5.9):

$$V_s I t_{on} = (V_o - V_s) I t_{off}^*$$

$$V_s t_{on} = V_o t_{off} - V_s t_{off}^*$$

$$V_s (t_{on} + t_{off}^*) = V_o t_{off}^*$$

$$V_s T = V_o t_{off}^*$$

$$V_o = V_s T / t_{off}^*$$



Известно, что:

$$t_{\text{он}} + t_{\text{оф}} = T;$$

$$t_{\text{оф}} = T - t_{\text{он}} = T - \delta T = (1 - \delta)T;$$

Поэтому:

$$V_0 = \frac{V_s T}{(1 - \delta)T};$$

$$V_0 = \frac{V_s}{1 - \delta}; \quad (5.10)$$

Так как  $\delta$  всегда меньше, чем 1, выходное напряжение больше, чем входное. Следовательно, данная схема является повышающим коммутатором.

## Задачи

**5.1.** Отдельно включенный электродвигатель постоянного тока потребляет ток 96 А при напряжении питания 500 В и скорости вращения 1000 оборотов в минуту. Сопротивление якоря  $R_a = 0,25$  Ом. Коммутатор используется для того, чтобы поддерживать скорость вращения двигателя в диапазоне 400—800 оборотов в минуту. Время включения коммутатора 2,5 мс. Определить диапазон частоты коммутатора. Напряжение 500 В подается на электродвигатель напрямую.

*Решение*

$$E_o = \delta E \text{ и частота} = 1/T.$$

*Вариант 1*

$$N_1 = 400 \text{ оборотов в минуту,}$$

Обратная электродвижущая сила при 1000 оборотах в минуту будет:

$$E_{b1} = V - I_a R_a = 500 - 96 \cdot 0,25;$$

$$E_{b1} = 476 \text{ В; } \frac{E_{b1}}{E_{b2}} = \frac{N_2 \Phi_2}{N_1 \Phi_1}.$$

Так как электродвигатель с независимым возбуждением,  $\Phi$  остается неизменным, поэтому  $E_{b2} = E_{b1} (N_2/N_1) = [400/1000] 476 = 190,4 \text{ В}$ .

Требуемое напряжение на клеммах для обеспечения скорости вращения 400 оборотов в минуту будет равно:

$$E_o = E_{b1} + I_a R_a = 190,4 + (96 \cdot 0,25) = 214,4 \text{ В}$$

Чтобы достигнуть скорости вращения электродвигателя 400 оборотов в минуту, необходимо напряжение 214,4 В.

$$E_o = E(T_{on}/T);$$

$$214,4 = 0,025 \cdot (500/T); T = 5,84 \text{ мкс.}$$

$$\text{Частота } f = 1/T = 171,2 \text{ Гц.}$$

*Вариант II*

$N = 800$  оборотов в минуту.

$$E_{o2} = E_{o1}(N_2/N_1) = (800/1000) 476 = 380,8 \text{ В.}$$

Требуемое напряжение на клеммах для обеспечения скорости вращения 800 оборотов в минуту будет равно:

$$E_o = E_{o1} + I_a R_a = 380,8 + (96 \cdot 0,25) = 404,8 \text{ В.}$$

$$\text{Но } E_o = E(T_{on}/T).$$

$$404,8 = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (500/T); T = 3,09 \text{ мс.}$$

$$\text{Частота } f = 1/T = 171,2 \text{ Гц.}$$

**5.2.** Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением имеет сопротивление якоря и обмотки возбуждения соответственно 0,4 и 100 Ом и работает при напряжении 100 В. Чтобы при постоянном крутящем моменте электродвигатель имел скорость вращения 1200 оборотов в минуту, необходим ток обмотки якоря 25 А. Для управления скоростью вращения электродвигателя используется коммутатор. Вычислите требуемое время включения, чтобы уменьшить скорость вращения до 800 оборотов в минуту при частоте коммутатора 500 Гц.

*Решение*

Обратная электродвижущая сила при 1200 об/мин будет:

$$E_{o1} = V - I_a R_a = 100 - 25 \cdot 0,4;$$

$$E_{o1} = 90 \text{ В};$$

$$E_{o2} = E_{o1}(N_2/N_1) = (800/1200) \cdot 90 = 60 \text{ В.}$$

Напряжение на клеммах при 800 об/мин равно:

$$E_{o2} + I_a R_a = 60 + 25 \cdot 0,4 = 70 \text{ В.}$$

Задано, что  $T_1 = T_2$ , или  $K \Phi I_{a1} = K \Phi I_{a2}$ ,  $I_{a1} = I_{a2}$ .

$$E_o = E(T_{on}/T); T = 1/f = 1/500 = 2 \text{ мс};$$

$$70 = 100 \cdot T_{on}/2; T_{on} = 1,4 \text{ мкс.}$$

**5.3.** Коммутатор напряжения питает электродвигатель постоянного тока. Входное напряжение составляет 60 В. Электродвигатель потребляет постоянный ток 60 А. Время выключения коммутатора 20 мкс. Вычислите значения  $L$  и  $C$ .

*Решение*

$$C = \frac{2t_q I_0}{V_s} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 60}{60} = 40 \text{ мкФ};$$

$$L = 1,1 \cdot \frac{V_s^2}{I_0^2} \cdot C = 1,1 \cdot \frac{60^2}{60^2} \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 44 \text{ мкГн.}$$

**5.4.** Для коммутатора тока, пиковое значение тока конденсатора вдвое превышает ток нагрузки. Напряжение питания составляет 230 В и  $t_g = 30 \text{ мкс}$ . Для тока нагрузки 200 А вычислите:

- 1) пиковое значение тока конденсатора;
- 2)  $L$  (величину индуктивности коммутатора);
- 3)  $C$  (величину емкости конденсатора коммутатора).

*Решение*

$$I_{cp} = 2I_o = 2 \cdot 200 = 400 \text{ А};$$

$$L = \frac{V_s I_c}{x t_0 (\pi - 2\theta)}; \frac{I_{cp}}{I_0} = 2 = x;$$

$$L = \frac{230 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 200 (\pi - 2\pi/6)} = 13,1 \text{ мкГн};$$

$$C = \frac{x I_0 t_g}{V_s (\pi - 2\theta)} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 60 \cdot 10^{-6}}{230 (\pi - 2\pi/6)} = 39,8 \text{ мкФ.}$$

**5.5.** Коммутатор нагрузки питает устройство постоянного тока, входное напряжение питания составляет 100 В. Максимальная рабочая частота коммутатора составляет 5 кГц. Вычислите величину коммутирующей емкости, если максимальный ток нагрузки 100 А.

*Решение*

$$C = \frac{I_{om}}{2E f_m} = \frac{100}{2 \cdot 100 \cdot 5000} = 100 \text{ мкФ.}$$

## Вопросы и ответы

1. Каковы функции диода свободного хода в коммутаторе?

*Ответ*

1) Диод предохраняет тиристор от воздействия высокого напряжения, которое может возникнуть, если разорвать индуктивную цепь.

2) Диод помогает сохранять постоянный ток в нагрузке.

3) Диод помогает переключать основной тиристор.

2. Какая силовая электронная цепь постоянного тока эквивалентна трансформатору?

*Ответ.* Коммутатор постоянного тока преобразует фиксированный постоянный ток в постоянный ток с переменным значением.

Трансформатор преобразует фиксированный переменный ток в переменный ток с переменным значением.

3. Каков недостаток коммутатора, работающего на переменной частоте?

*Ответ.* Затруднена разработка фильтра.

4. Какова функция диода в коммутаторе типа В или регенеративном коммутаторе?

*Ответ.* Предотвращение короткого замыкания источника постоянного тока.

5. Почему в коммутаторе нагрузки не требуется индуктивность для переключения тиристора?

*Ответ.* Для этого используется индуктивность самой нагрузки.

6. Какова функция диода, последовательно соединенного с индуктивностью в коммутаторе напряжения?

*Ответ.* Диод предотвращает изменение направления тока, поэтому напряжение на конденсаторе сохраняет полярность, требуемую для коммутирования напряжения.

7. Где применяются коммутаторы постоянного тока?

*Ответ*

1) В электровозах.

2) В аккумуляторах автомобилей.

3) В силовых устройствах.

8. Каковы недостатки коммутаторов постоянного тока?

*Ответ*

1) Принудительная коммутация.

2) Они создают электромагнитные помехи.

3) Они имеют большие потери при переключении и большие выбросы напряжения.

## ГЛАВА 6

## ИНВЕРТОРЫ

### 6.1. Введение

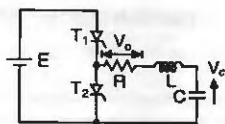
Инверторы преобразуют мощность постоянного тока в мощность переменного тока с регулируемым напряжением и частотой. Эти устройства применяются при индукционном нагреве, в источниках бесперебойного питания, на линиях электропередачи высокого напряжения на постоянном токе и при регулировании скорости вращения электродвигателей переменного тока. В этой главе рассматриваются основные типы инверторов.

### 6.2. Последовательный инвертор

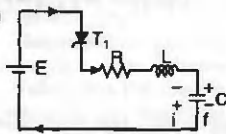
Электрическая схема, рабочие фазы и формы выходных сигналов последовательного инвертора изображены на рис. 6.1. Такая схема называется последовательным инвертором, поскольку в ней нагрузочное сопротивление включено последовательно с емкостью.  $R$  — нагрузочное сопротивление,  $L$  и  $C$  — коммутационные элементы. Такой тип инвертора содержит два тиристора. Рассмотрим подробнее фазы работы такой схемы.

**Фаза 1.** Тиристор  $T_1$  включается в момент времени  $t_0$ . Начинается заряд конденсатора от источника питания. Последовательная цепь  $R, L$  и  $C$  формирует синусоидальный ток через нагрузочное сопротивление и выполняет функцию демпфирующей цепи. Когда ток в цепи уменьшается до нуля, тиристор  $T_1$  запирается. Напряжение на нагрузочном сопротивлении находится в фазе с током тиристора. Формы напряжений  $V_L$  и  $V_C$  можно получить с помощью теоремы Кирхгофа: ( $V_L + V_C = E$ ). величины  $V_L$  и  $V_C$  должны удовлетворять условиям этого уравнения.

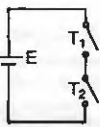
а)



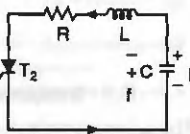
б)



Фаза I



Фаза II



Фаза III

в)

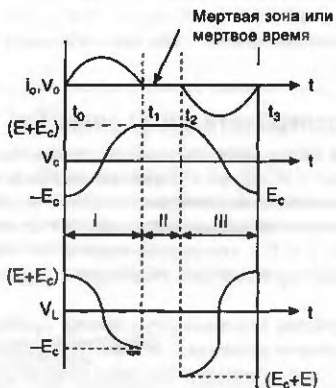


Рис. 6.1. Последовательный инвертор:

а) Электрическая схема;

б) Фазы работы схемы;

в) Формы напряжений и токов в цепях последовательного инвертора

**Фаза II.** Тиристор  $T_2$  не должен включаться сразу после того, как ток через тиристор  $T_1$  уменьшится до нуля. Для лучшего запираания тиристора  $T_1$  к нему необходимо приложить небольшое обратное напряжение. Если тиристор  $T_2$  включается без запаздывания, или мертвая зона отсутствует, напряжение источника питания замыкается через открытые тиристоры  $T_1$  и  $T_2$ . Если оба тиристора находятся в закрытом состоянии, то  $V_R = 0$ ,  $V_L = 0$ , следовательно,  $L di/dt = 0$  и конденсатор  $C$  остается незаряженным.

**Фаза III.** В момент времени  $t_2$  тиристор  $T_2$  включается и инициирует отрицательный полупериод. Конденсатор разряжается через  $L$ ,  $R$  и  $T_2$ . Следует заметить, что электрический ток через нагрузочное сопротивление  $R$  протекает в противоположном направлении. В момент времени, когда этот ток уменьшается до нуля, тиристор  $T_2$  выключается. Формы напряжений  $V_L$  и  $V_C$  можно получить с помощью теоремы Кирхгофа ( $V_L + V_C = 0$ ), величины  $V_L$  и  $V_C$  должны удовлетворять условиям этого уравнения.

Если тиристор  $T_1$  запустить с задержкой на величину мертвого времени, вышеупомянутые процессы повторятся.

### Преимущества

1. Простая конструкция.
2. Выходное напряжение близко к синусоидальному.

### Недостатки

1. Индуктивность  $L$  и конденсатор  $C$  имеют большие габариты.
2. Источник питания используется только в течение положительного полупериода.
3. В выходном напряжении имеются высшие гармоники из-за наличия мертвой зоны.

Последовательный инвертор лучше всего подходит для высокочастотных устройств, так как для требуемых значений  $L$  и  $C$  уменьшаются их габариты. Время периода для одного цикла составляет:

$$T_0 = T_r + 2 t_d$$

где  $T_r = 1/f_r$  и  $t_d$  — мертвое время. Тогда:

$$f_0 = \frac{1}{T_r + 2t_d}, \quad (6.1)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad (6.2)$$

Выходная частота последовательного инвертора всегда меньше резонансной частоты вследствие наличия мертвой зоны. Значение выходной частоты может варьироваться путем изменения мертвого времени.

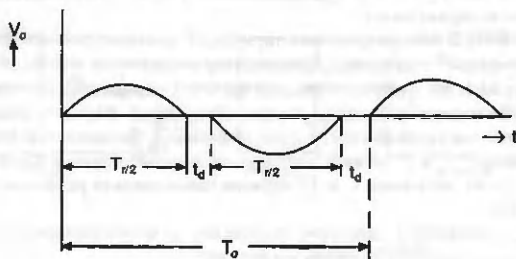


Рис. 6.1г. Форма выходного напряжения последовательного инвертора

### 6.3. Параллельный инвертор

Базовая схема параллельного инвертора изображена на рис. 6.2а. Когда ключ 1 замкнут, помеченные точкой выводы обмоток А, D и С имеют положительный потенциал. Выходное напряжение — положительное. Во второй половине периода ключ 1 размыкается и замыкается ключ 2. Помеченные точкой выводы обмоток А, D и С имеют отрицательный потенциал и выходное напряжение — отрицательное.

Электрическая схема, рабочие фазы и формы выходных сигналов параллельного инвертора изображены на рис. 6.2. Параллельные инверторы применяются в низкочастотных устройствах. В них используются трансформатор с отводом из центра первичной обмотки, два тиристора и коммутирующий конденсатор. Источник питания включается между центральным выводом и общей точкой катодов тиристоров. Эквивалентное нагрузочное сопротивление, пересчитанное в цепь первичной обмотки, подключено параллельно коммутационному конденсатору. Следовательно, инвертор такого типа является параллельным.



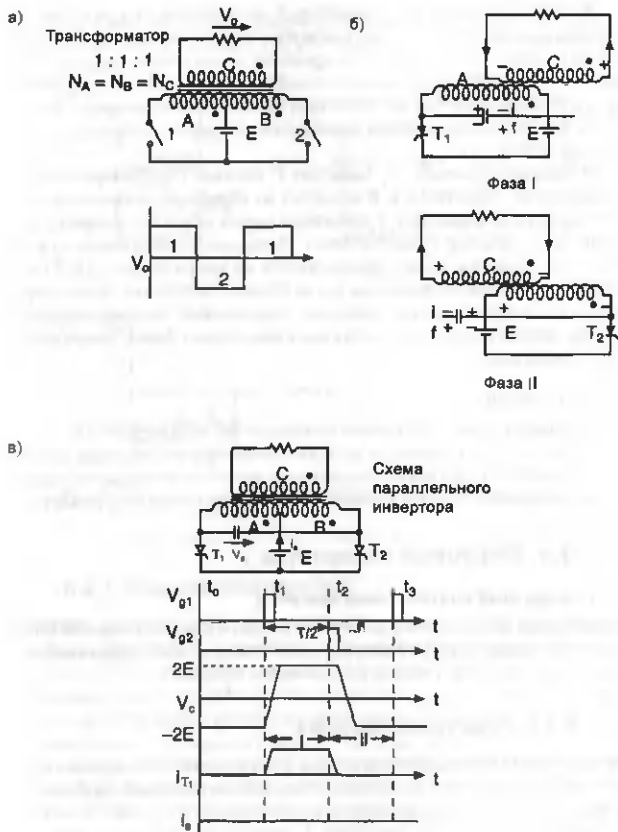


Рис. 6.2. а) Базовая схема параллельного инвертора;

б) Фазы работы схемы;

в) Формы напряжений и токов в цепях параллельного инвертора

В момент времени  $t = t_1$  тиристор  $T_1$  включается. Напряжение источника питания  $E$  приложено к обмотке трансформатора А. Согласно закону самоиндукции такое же напряжение  $E$  индуцируется на обмотке трансформатора В, но противоположной полярности. Поскольку обмотки А и В соединены последовательно, на них будет суммарное напряжение  $2E$ . Этим напряжением конденсатор предварительно заряжается до напряжения  $+2E$ .

В момент времени  $t = t_2$  тиристор  $T_2$  включается. Полярность напряжений на обмотках А и В меняется на обратную, к конденсатору, и тем самым к тиристору  $T_1$  прикладывается обратное напряжение, за счет чего тиристор  $T_1$  выключается. Полярность напряжения на конденсаторе меняется, и он перезаряжается до напряжения  $-2E$ . Также меняет на обратное направление ток во вторичной обмотке, то есть через нагрузочное сопротивление протекает переменный ток прямоугольной формы. Форма выходного напряжения аналогична форме напряжения на конденсаторе.

### Недостатки

1. Номинальное напряжение конденсатора должно быть  $2E$ .
2. Ток источника питания не является чистым постоянным током.
3. Колебания тока источника питания являются причиной дополнительного выделения тепла в первичной цепи параллельного инвертора.

## 6.4. Мостовые инверторы

### Однофазный полумостовой инвертор

Однофазный полумостовой инвертор состоит из двух источников питания и двух коммутаторов. Нагрузка подключена между общим выводом источников питания и общей точкой коммутаторов.

#### 6.4.1. Резистивная нагрузка

Электрическая схема, рабочие фазы и форма выходного сигнала однофазного полумостового инвертора с резистивной нагрузкой изображены на рис. 6.3. Тиристор  $T_1$  находится в проводящем состоянии в течение периода  $T_0/2$  ( $T_0 = 1/f_0$ ). Тиристор  $T_2$  включается в момент времени  $T_0/2$  и инициирует отрицательный полупериод тока нагрузки, за счет чего тиристор  $T_1$  выключается. В момент времени  $T_0$  снова включается тиристор  $T_1$ , а тиристор  $T_2$  выключается. Этот процесс повторяется,

тем самым обеспечивается непрерывное прямоугольное напряжение на нагрузке. Это возможно, так как тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  одновременно не запускаются,

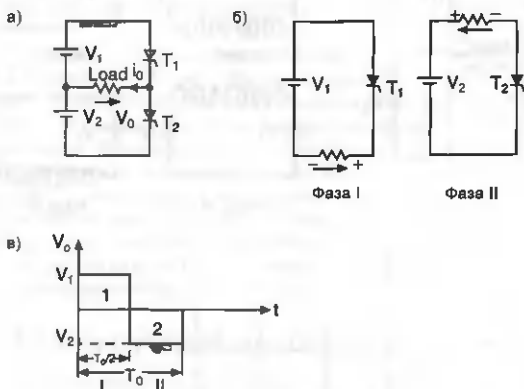


Рис. 6.3. а) Схема полумостового инвертора с резистивной нагрузкой;  
б) Фазы работы схемы;  
в) Форма напряжения и тока полумостового инвертора

### 6.4.2. Индуктивная нагрузка

Принцип действия схемы можно объяснить, рассмотрев четыре фазы ее работы. Диоды  $D_1$  и  $D_2$  называются возвратными диодами. Инвертор не может управлять индуктивной нагрузкой без возвратных диодов. Без диодов в схеме имеются большие выбросы напряжения при переключении тиристоров, поскольку нагрузка индуктивная. Эти выбросы напряжения могут разрушить тиристоры. Электрическая схема, рабочие фазы и форма выходного сигнала однофазного полумостового инвертора с индуктивной нагрузкой изображены на рис. 6.4.

**Фаза I.** Тиристор  $T_1$  находится в проводящем состоянии, и через нагрузку протекает ток положительного полупериода. Ток через индуктивную нагрузку линейно увеличивается. В момент времени  $t = t_1$  тиристор  $T_1$  принудительно закрывается за счет изменения полярности напряжения на нагрузке. Направление тока при этом сохраняется.

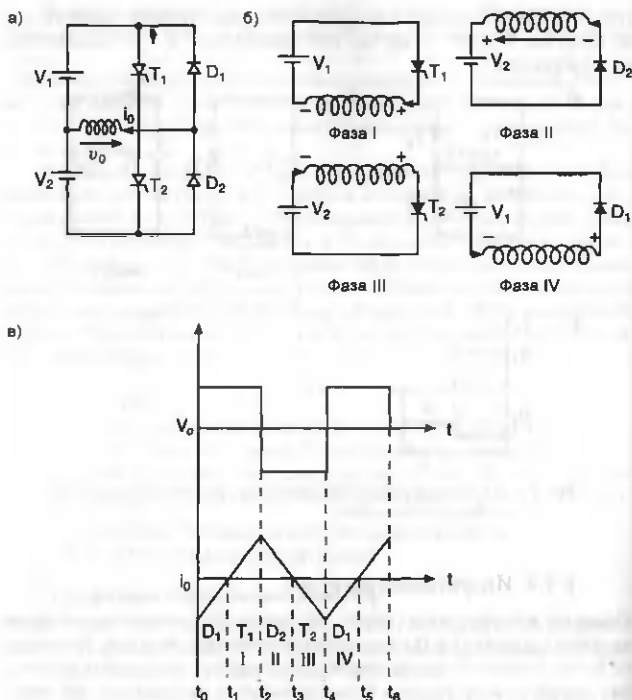


Рис. 6.4. а) Схема полумостового инвертора с индуктивной нагрузкой;  
 б) Фазы работы схемы;  
 в) Форма напряжения полумостового инвертора

**Фаза II.** Ток со стороны нагрузки смещает в прямом направлении диод  $D_2$ , и он переходит в состояние проводимости. Мощность со стороны нагрузки передается в источник питания  $V_2$ . Когда величина тока падает до нуля, диод  $D_2$  запирается.

**Фаза III.** Пока диод  $D_1$  проводит ток, тиристор  $T_2$  не может находиться в состоянии проводимости, поскольку он смещен в обратном

направлении. Как только диод  $D_2$  запирается, можно включить тиристор  $T_2$ . На промежутке времени  $t_2 - t_3$  напряжение и ток отрицательные, а мощность — положительная, то есть мощность передается от источника питания к нагрузке. В момент времени  $t = t_4$  тиристор  $T_2$  принудительно включается.

**Фаза IV.** На индуктивной нагрузке изменяется полярность напряжения, но направление тока через нее сохраняется. За счет изменения полярности напряжения диод  $D_1$  смещается в прямом направлении. Ток теперь течет по направлению к источнику питания  $V_1$ , имеет место рециркуляция мощности. Этот процесс продолжается до тех пор, пока диод  $D_1$  не перейдет в закрытое состояние в момент времени  $t_5$ . Если тиристор  $T_1$  снова включить, вышеупомянутые процессы повторятся.

При работе инвертора на  $RL$ -нагрузку ток в цепи изменяется экспоненциально. Площади положительных и отрицательных периодов не равны, так как на резистивной компоненте нагрузки в противофазные периоды рассеиваются разные мощности.

### 6.4.3. Полумостовой инвертор с $RLC$ -нагрузкой

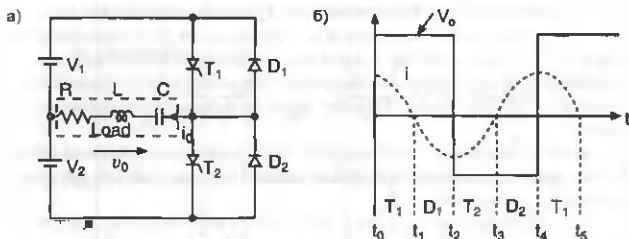


Рис. 6.5. а) Схема полумостового инвертора с  $RLC$ -нагрузкой; б) Форма напряжения и тока полумостового инвертора

Электрическая схема и форма выходного сигнала однофазного полумостового инвертора с  $RLC$ -нагрузкой изображены на рис. 6.5. Если инвертор питает  $RLC$ -нагрузку, отдельная цепь коммутирования не требуется. Это можно объяснить с помощью символического изображения на рис. 6.5б. Рабочая частота инвертора должна быть выбрана такой, чтобы  $X_C > X_L$ . При этих условиях в этой схеме ток опережает по фазе напряжение. Ток в нагрузке изменяется синусоидально. В промежутке

времени от  $t_0$  до  $t_1$  тиристор  $T_1$  находится в проводящем состоянии. В момент времени  $t = t_1$  тиристор  $T_1$  выключается, так как ток в цепи уменьшается до нуля. В промежутке времени от  $t_1$  до  $t_2$  диод  $D_1$  находится в проводящем состоянии и мощность передается от нагрузки к источнику питания. Диод  $D_1$  находится в проводящем состоянии до тех пор, пока на конденсаторе присутствует напряжение. Когда диод  $D_1$  находится в состоянии проводимости, тиристор  $T_1$  смещен в обратном направлении. Таким образом, специльная цепь принудительной коммутации в этом случае не требуется. В этой схеме  $RCL$ -нагрузка обеспечивает коммутацию тириستоров. В течение отрицательного полупериода тиристор  $T_2$  находится в проводящем состоянии, через некоторое время диод  $D_2$  начинает проводить, вследствие этого тиристор  $T_2$  смещается в обратном направлении и запирается.

### 6.5. Инвертор Мак-Мюррея (инвертирующий преобразователь)

Принцип работы инвертора Мак-Мюррея основан на коммутировании тока. Полумостовой инвертор работает на индуктивную нагрузку, как изображено на рис. 6.6. Тиристоры  $T_{A1}$  и  $T_{A2}$  в этой схеме являются вспомогательными. Они используются для коммутации основных тиристоров  $T_1$  и  $T_2$ . Индуктивность  $L$  и емкость  $C$  являются коммутирующими элементами. Конденсатор предварительно заряжен слева отрицательно, а справа — положительно. Рабочие фазы этой схемы устройства следующие.

**Фаза I.** Тиристор  $T_1$  запускается, тем самым инициируется положительный полупериод преобразования. Постоянный ток нагрузки протекает через тиристор  $T_1$ .

**Фаза II.** В момент времени  $t_1$  запускается вспомогательный тиристор  $T_{A1}$ . По замкнутой цепи  $L$ ,  $C$ ,  $T_1$  и  $T_{A1}$  начинает протекать ток, при этом ток через конденсатор синусоидально нарастает, как показано на рис. 6.6в. В промежутке времени от  $t_1$  до  $t_2$  значение  $i_c < I_0$ . В момент времени  $t = t_2$   $i_c = I_0$ . Ток, текущий через тиристор  $T_1$ , становится равным нулю, и тиристор выключается. Следует заметить, что в этой фазе ток через тиристор  $T_1$  уменьшается до нуля.

**Фаза III.** После выключения тиристора  $T_1$  ток продолжает протекать через  $D_1$ . Диод находится в состоянии проводимости до момента времени  $t_3$ , до тех пор пока  $i_c - I_0$  положительны. В момент времени  $t = t_3$  диод  $D_1$  перестает проводить, так как ток через него уменьшается до нуля.

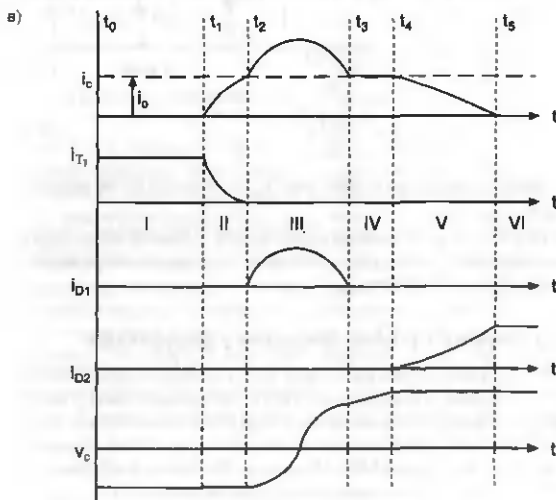
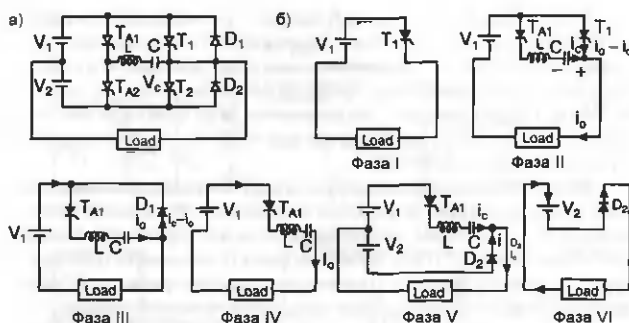


Рис. 6.6. а) Схема инвертора Мак-Мюррея;  
 б) Фазы работы схемы;  
 в) Формы напряжения и токов инвертора Мак-Мюррея

Фаза IV. После того как диод  $D_1$  запирается, постоянный ток нагрузки протекает через конденсатор и дозаряжает его слева отрицательно, а справа положительно. Напряжение на конденсаторе изменяется линейно, так как через конденсатор протекает постоянный ток.

Фаза V. Ток через диод увеличивается, в то время как ток через конденсатор уменьшается. Когда ток через тиристор  $T_A$  уменьшается до нуля, тиристор выключается.

Фаза VI. На индуктивной нагрузке изменяется полярность напряжения, и диод  $D_2$  смещается в прямом направлении. Начинается процесс рециркуляции. Энергия, запасенная в нагрузке, передается обратно в источник питания  $V_2$ . После запираания диода  $D_2$  запускается тиристор  $T_2$ . Чтобы выключить тиристор  $T_2$  необходимо включить тиристор  $T_{A2}$ . Далее подобные процессы повторяются аналогично вышеизложенным.

Индуктивность  $L$  и емкость  $C$  можно рассчитать с помощью следующих формул:

$$C = \frac{0,89 I_{om} t_c}{V_{min}}, \quad (6.3)$$

$$L = \frac{0,39 t_c V_{min}}{I_{om}}, \quad (6.4)$$

где  $I_{om}$  — максимальный выходной ток;  $V_{min}$  — минимальное выходное напряжение.

При разработке инвертора его параметры выбираются исходя из наилучших условий, таких как минимальное входное напряжение и максимальный выходной ток.

## 6.6. Инвертор Мак-Мюррея – Бедфорда

Инвертор Мак-Мюррея содержит два вспомогательных тиристора. Инвертор Мак-Мюррея – Бедфорда не требует никаких вспомогательных тириستоров. Один основной тиристор в этой схеме коммутирует другой основной тиристор. Электрическая схема, рабочие фазы и форма выходного сигнала инвертора Мак-Мюррея – Бедфорда изображены на рис. 6.7. Рабочие фазы этой схемы устройства следующие.

Фаза I. Тиристор  $T_1$  запущен. Постоянный ток протекает через тиристор  $T_1$  и индуктивность  $L_1$ . Напряжение на индуктивности  $L_1$  равно нулю, так как через нее протекает постоянный ток. Конденсатор  $C_1$  замкнут



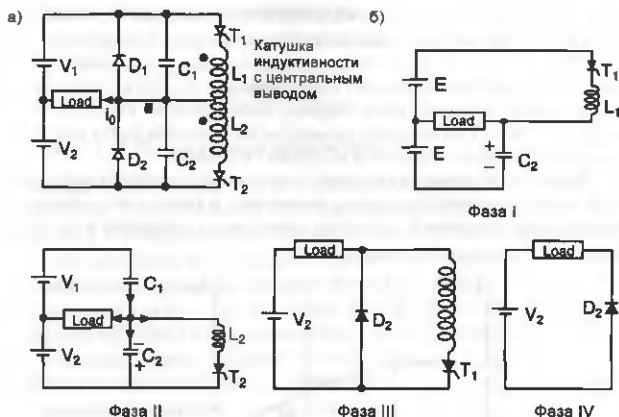


Рис. 6.7. а) Схема инвертора Мак-Мюррея;  
б) Фазы работы схемы

через  $T_1$  и  $L_1$ . Конденсатор  $C_2$  заряжен до напряжения  $V_1 + V_2$ ; верхняя обкладка заряжена положительно, а нижняя — отрицательно.

**Фаза II.** После включения тиристора  $T_2$  напряжение с конденсатора  $C_1$  подается на индуктивность  $L_2$ . Это напряжение равно удвоенному напряжению питания. За счет взаимной индукции на индуктивности  $L_1$  появляется напряжение, равное напряжению на индуктивности  $L_2$ . Напряжение на катоде тиристора  $T_1$  равно учетверенному напряжению питания, а на аноде удвоенному напряжению питания. Таким образом, после включения тиристора  $T_2$  тиристор  $T_1$  выключается. Быстрое выключение тиристора  $T_1$  возможно благодаря тому, что энергия, запасенная в индуктивности  $L_1$ , передается на индуктивность  $L_2$ , поскольку общий магнитный поток должен оставаться постоянным. Из рис. 6.7в видно, что ток в схеме перераспределяется от тиристора  $T_1$  на тиристор  $T_2$  в начале фазы II. По цепи  $L_2$  и  $C_2$  начинает протекать ток. Диод  $D_2$  смещается в обратном направлении напряжением на конденсаторе  $C_2$ .

**Фаза III.** Как только полярность напряжения на конденсаторе изменяется на обратную, диод  $D_2$  переходит в проводящее состояние и тем самым шунтирует конденсатор  $C_2$ . Энергия, запасенная на индуктивности  $L_2$ , поддерживает неизменное направление тока через тиристор  $T_2$  и

диод  $D_2$ . Постепенно запасенная в индуктивности  $L_2$  энергия рассеивается на активном сопротивлении нагрузки, и тиристор  $T_2$  выключается.

**Фаза IV.** Диод  $D_2$  по-прежнему смещен в прямом направлении за счет тока, протекающего через индуктивность нагрузки. Здесь имеет место процесс рециркуляции энергии, запасенной на индуктивности нагрузки. Диод  $D_2$  находится в проводящем состоянии до тех пор, пока запасенная энергия передается источнику питания  $V_2$ .

Тиристор  $T_2$  снова включается, тем самым иницируя аналогичный отрицательный полупериод инвертора. В конце отрицательного полупериода тиристор  $T_1$  остается в проводящем состоянии и процесс, описанный выше, повторяется.

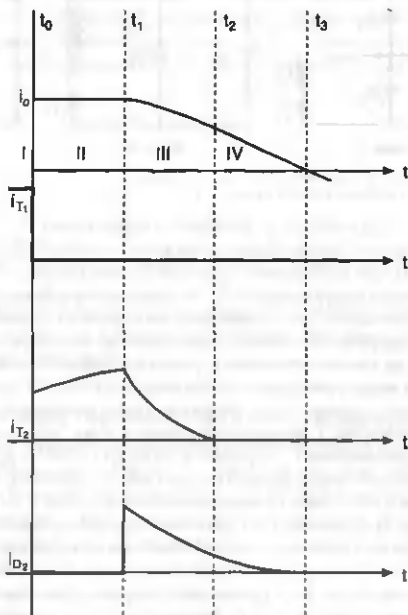


Рис. 6.7в. Формы токов инвертора Мак-Мюррея — Бедфорда

## 6.7. Трехфазные инверторы

Трехфазные инверторы могут быть использованы в двух режимах:

- 1) 120-градусный режим работы;
- 2) 180-градусные режимы работы.

### 6.7.1. 120-градусный режим работы

Тиристоры здесь нумеруются по аналогии с трехфазными двухполупериодными выпрямителями. Разность номеров тиристоров в каждой фазе равна трем. К трехфазному мостовому инвертору подключена активная нагрузка, состоящая из трех резисторов, как показано на рис. 6.8. При 120-градусном режиме работы каждый тиристор находится в проводящем состоянии от 0 до  $120^\circ$  за период. В любое время два тиристора в этой схеме находятся в проводящем состоянии, и два из трех нагрузочных резисторов являются потребителями мощности. Когда тиристор из нечетной группы находится в проводящем состоянии, соответствующее ему фазовое напряжение — положительное. Если же в проводящем состоянии находится тиристор из четной группы, соответствующее ему фазовое напряжение — отрицательное. Фазовые напряжения здесь представляют собой 120-градусные псевдопрямоугольные последовательности импульсов. Выходные линейные напряжения имеют формы шестиступенчатых последовательностей импульсов, сдвинутых на  $120^\circ$  по отношению друг к другу. Формы фазовых и линейных напряжений приведены на рис. 6.8б.

Запуск тиристоров в этой схеме осуществляется в последовательности 61—12—23—34—45—56. Выходная частота определяется частотой запуска тиристоров.

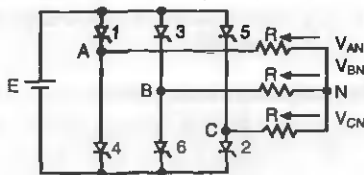


Рис. 6.8а. 120-градусный режим работы инвертора. Схема трехфазного мостового инвертора

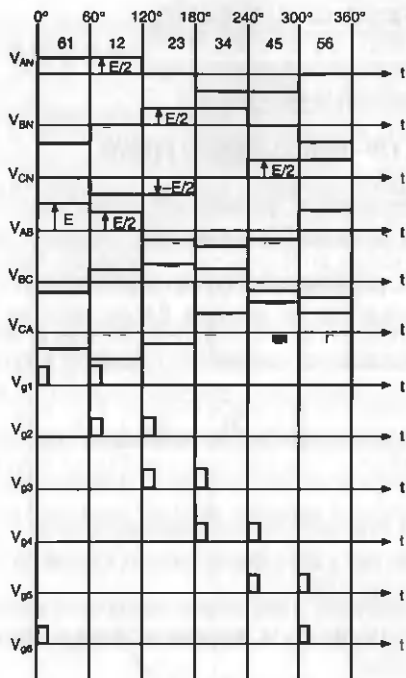


Рис. 6.86. 120-градусный режим работы инвертора. Формы фазовых и линейных напряжений

### 6.7.2. 180-градусный режим работы

При 180-градусном режиме каждый тиристор находится в состоянии проводимости половину периода. В этом режиме работы инвертора возможны два способа коммутации тириستоров — два тиристора из нечетной группы и один тиристор из четной группы или два из четной группы и один из нечетной группы находятся в проводящем состоянии.

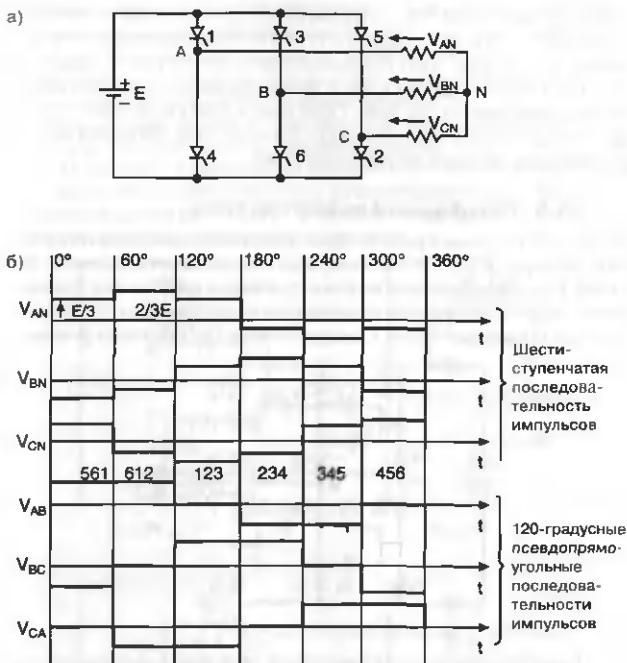


Рис. 6.9. 180-градусный режим работы инвертора:

а) Схема трехфазного мостового инвертора;  
 б) Формы фазовых и линейных напряжений

Фазовое напряжение инвертора будет положительным, если тиристоры из нечетной группы находятся в проводящем состоянии, и отрицательным, если тиристоры четной группы находятся в проводящем состоянии. В любое время два нагрузочных резистора подключены к источнику питания параллельно, а третий подключен последовательно к ним. На двух параллельно соединенных резисторах выходное напряжение будет  $V/3$ , а на третьем —  $2V/3$ . Линейные напряжения здесь

представляют собой 120-градусные псевдопрямоугольные последовательности импульсов. Выходные фазовые напряжения инвертора имеют формы шестиступенчатых последовательностей импульсов, сдвинутых на  $120^\circ$  по отношению друг к другу. Формы фазовых и линейных напряжений приведены на рис. 6.9б. Тиристоры в этой схеме запускаются в последовательности 561—612—123—234—345—456. Выходная частота определяется частотой запуска тиристоров.

### 6.8. Трехфазный инвертор тока

Электрическая схема и рабочие фазы трехфазного инвертора тока изображены на рис. 6.10. Этот тип инвертора называется инвертором К. Филлипса. Его работа основана на коммутировании напряжения. Большая индуктивность, включенная последовательно с источником напряжения, работает как источник тока. Схема работает в 120-градусном режиме.

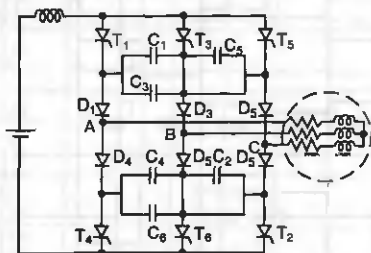


Рис. 6.10а. Схема трехфазного инвертора тока

Чтобы выключить шесть тиристоров, требуются шесть конденсаторов. Диоды  $D_1-D_6$  предотвращают разряд конденсаторов через нагрузку. Эти диоды называются изолирующими. Тиристоры в этой схеме запускаются в последовательности 12—23—34—45—56—61. Если схема переходит из состояния 12 в состояние 23, тиристор  $T_2$  продолжает оставаться в проводящем состоянии, следовательно, тиристор  $T_1$  запирается, а ток продолжает протекать через включенный тиристор  $T_3$ .

**Фаза 1.** Конденсатор  $C_1$  заряжен с левой стороны до напряжения  $+U_e$ , а с правой — до напряжения  $-U_e$ . Тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  запускаются согласно диаграмме 120-градусного режима работы. Схема остается в этом состоянии от 0 до  $60^\circ$ .

**Фаза II.** В следующий 60-градусный интервал тиристоры  $T_3$  и  $T_2$  должны находиться в проводящем состоянии. Тиристор  $T_3$  запускается начиная с 60-градусного интервала. Тиристор  $T_1$  выключается коммутирующим напряжением. Ток протекает через  $D_1$ , фазу А и фазу С. Напряжение на конденсаторе  $C_1$  меняет полярность.

**Фаза III.** Диод  $D_1$  продолжает оставаться в проводящем состоянии до тех пор, пока ток через него протекает в том же самом направлении. Диод  $D_3$  находится в проводящем состоянии, так как он смещен в прямом направлении присутствующим на конденсаторе  $C_1$  напряжением. В этой фазе все три ветви нагрузки являются потребителями мощности. Эта фаза называется периодом перекрытия.

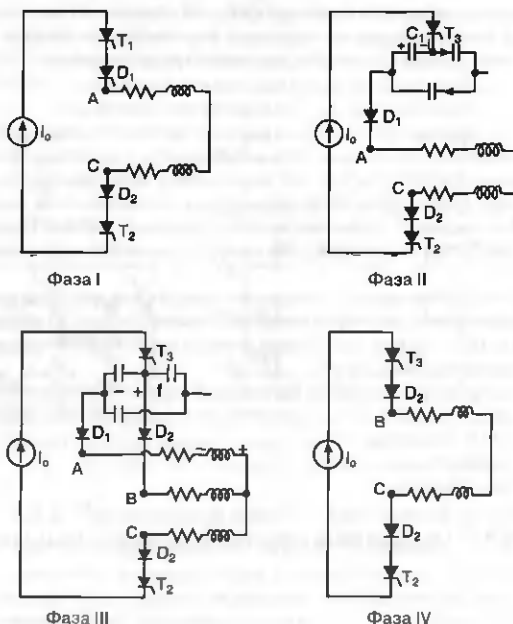


Рис. 6.106. Фазы работы схемы

**Фаза IV.** Диод  $D_1$  находится в проводящем состоянии до тех пор, пока энергия, запасенная на индуктивности нагрузки в фазе А, не уменьшится до нуля. Далее ток протекает через тиристоры  $T_2$  и  $T_3$  согласно диаграмме управления при 120-градусном режиме работы инвертора.

Формы фазовых токов трехфазного инвертора тока эквивалентны формам фазовых напряжений трехфазного инвертора напряжения при 120-градусном режиме работы.

## 6.9. Управление выходным напряжением инвертора

Выходным напряжением инвертора требуется управлять в таких устройствах, как регулятор скорости, источники бесперебойного питания и т. д. Управлять выходным напряжением можно тремя способами:

- 1) регулированием входного напряжения инвертора;
- 2) регулированием выходного напряжения инвертора;
- 3) регулированием выходного напряжения самим инвертором.

Входное напряжение можно регулировать с помощью фазоуправляемого преобразователя или коммутатора, включенного на входе инвертора. Недостатком фазоуправляемого преобразователя является низкий коэффициент мощности со стороны входа инвертора. Недостатком коммутатора постоянного тока являются высокие коммутационные потери.

Выходное переменное напряжение инвертора можно регулировать с помощью трансформатора с коммутируемыми отводами от вторичной обмотки. Недостатком коммутации отводов является необходимость в обслуживании размыкателей.

Регулирование выходного напряжения самим инвертором называется широтно-импульсной модуляцией. Различают два типа широтно-импульсных модуляторов:

- 1) однократные;
- 2) многократные.

### 6.9.1. Однократный широтно-импульсный модулятор

Электрическая схема инвертора и формы сигналов однократного широтно-импульсного модулятора изображены на рис. 6.11. Однократный широтно-импульсный модулятор вырабатывает один управляющий импульс за полупериод цикла преобразования. Выходное напряжение



инвертора регулируется за счет изменения длительности управляющего импульса в каждом полупериоде цикла преобразования. Эпюры управляющих импульсов однократного широтно-импульсного модулятора изображены на 6.11б. На выходе инвертора присутствует напряжение, только если транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  (или)  $T_3$  и  $T_4$  находятся в проводящем состоянии одновременно.

В промежутке времени от  $t_0$  до  $t_1$  в проводящем состоянии находятся транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ . В это время на нагрузке положительное напряжение. В промежутке времени от  $t_2$  до  $t_3$ , проводящем состоянии находятся транзисторы  $T_3$  и  $T_4$ , на нагрузке при этом отрицательное напряжение. Выходным напряжением инвертора можно управлять, изменяя угол  $\theta$ . Чем больше значение  $\theta$ , тем меньше выходное напряжение инвертора, и наоборот. Недостатком этого способа регулирования является присутствие в выходном напряжении большого количества высших гармоник.

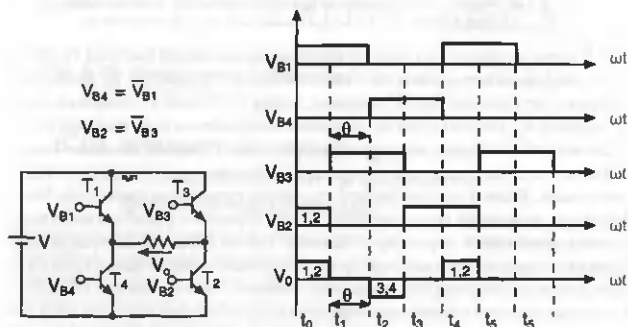


Рис. 6.11. а) Схема мостового инвертора;  
б) Формы сигналов широтно-импульсного модулятора

### 6.9.2. Многократный широтно-импульсный модулятор

Многократный широтно-импульсный модулятор вырабатывает серию управляющих импульсов за полупериод цикла преобразования. Существуют два типа многократных широтно-импульсных модуляторов: а) широтно-импульсный модулятор с равными длительностями управляющих импульсов и б) синусоидальный широтно-импульсный модулятор.

### Широтно-импульсный модулятор с равными длительностями управляющих импульсов

Формы сигналов симметричного широтно-импульсного модулятора или широтно-импульсного модулятора с равными длительностями управляющих импульсов изображены на рис. 6.12а. Допустим, что  $V_T$  — напряжение треугольной формы,  $V_C$  — управляющее напряжение и  $V_O$  — выходное напряжение компаратора.

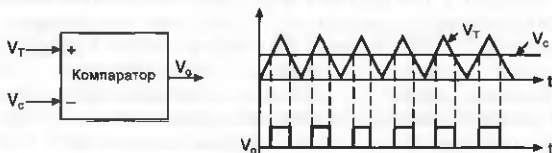


Рис. 6.12а. Формы сигналов симметричного широтно-импульсного модулятора

В схеме управления опорное напряжение высокой частоты  $V_T$  (треугольной формы) сравнивается с напряжением управления  $V_C$ . Выходное напряжение компаратора  $V_O$  высокое, когда  $V_T$  больше  $V_C$ , и низкое, если  $V_T$  меньше  $V_C$ . Таким образом, выходное напряжение компаратора представляет собой последовательность импульсов. Сформированные таким образом импульсы можно использовать для управления мощными транзисторами. Если в инверторе используются тиристоры (инвертор Мак-Мюррея), основной тиристор запускается передним фронтом импульса, а вспомогательный тиристор — задним. Таким образом, многократный широтно-импульсный модулятор вырабатывает серию управляющих импульсов за полупериод цикла преобразования. Гармонические составляющие в выходном напряжении такого инвертора будут намного меньше, чем в инверторе с однократным широтно-импульсным модулятором.

### Синусоидальный широтно-импульсный модулятор

Формы сигналов синусоидального широтно-импульсного модулятора изображены на рис. 6.12б. В этой схеме напряжение треугольной формы сравнивается с синусоидальным управляющим напряжением. Входные напряжения компаратора  $V_C$  и  $V_T$ . Выходное напряжение компаратора высокое, когда величина синусоидального управляющего напряжения больше, чем величина напряжения треугольной формы. Отношение величины управляющего напряжения к величине напряжения треугольной

формы определяется как коэффициент модуляции. Следует заметить, что выходное напряжение компаратора представляет собой последовательность импульсов неравной длительности. В течение полупериода цикла преобразования длительность центрального импульса максимальна, а длительность крайних импульсов уменьшается. Длительность управляющих импульсов изменяется синусоидально. Этот тип широтно-импульсного модулятора называется асимметричным, так как длительности его управляющих импульсов неравны. Гармонические составляющие в выходном напряжении такого инвертора будут меньше, чем в инверторе с симметричным широтно-импульсным модулятором.

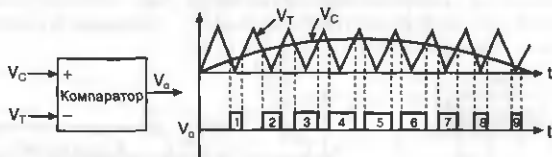


Рис. 6.126. Формы сигналов синусоидального широтно-импульсного модулятора

### 6.10. Управление гармоническими составляющими (управление формой напряжения)

Формы выходных напряжений инверторов могут быть прямоугольными, квазипрямоугольными, треугольными или в виде шестиступенчатых последовательностей импульсов. В выходном напряжении содержатся основная гармоника и ее высшие компоненты. Если инвертор используется в качестве источника питания асинхронного электродвигателя, высшие гармоники питающего напряжения вносят потери в виде дополнительного выделения тепла. Например, пятая гармоника питающего электродвигателя напряжения производит крутящий момент в противоположном направлении по отношению к основному крутящему моменту. Поэтому предпочтительно минимизировать коэффициент гармоник в выходном напряжении. Методы уменьшения гармоник следующие:

- 1) коммутация промежуточных отводов в трансформаторе;
- 2) подключение нагрузки через трансформатор;
- 3) использование фильтров;
- 4) использование широтно-импульсной модуляции.

### 6.10.1. Коммутация промежуточных отводов в трансформаторе

Электрическая схема инвертора с коммутацией промежуточных отводов в трансформаторе изображена на рис. 6.13а. Схема этого инвертора похожа на схему параллельного инвертора. Когда один из тиристоров слева находится в проводящем состоянии, выходное напряжение инвертора — положительное, если же один из тиристоров справа находится в проводящем состоянии, выходное напряжение — отрицательное. Когда тиристор 1 запускается, напряжение источника питания прикладывается к половине первичной обмотки трансформатора. Выходное напряжение инвертора в этом случае минимальное, поскольку отношение «вольт/виток» минимальное.

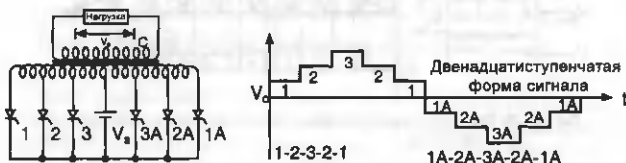


Рис. 6.13а. Электрическая схема инвертора с коммутацией промежуточных отводов в трансформаторе

В следующий момент времени запускается тиристор 2, а тиристор 1 выключается. Отношение «вольт/виток» увеличивается, и выходное напряжение инвертора также увеличивается. После запуска тиристора 3 тиристор 2 выключается, выходное напряжение инвертора становится максимальным. Для получения двенадцатиступенчатой формы выходного напряжения тиристоры должны запускаться в последовательности 1-2-3-2-1-1A-2A-3A-2A-1A. Недостатком этой схемы является сложность запуска и коммутирования тириستоров.

### 6.10.2. Подключение через трансформатор

Схема компенсации гармонических составляющих с помощью двух трансформаторов изображена на рис. 6.13б. Выходное напряжение в этой схеме является векторной суммой выходных напряжений двух инверторов. Этот метод применяется для компенсации конкретной гармонической составляющей в выходном напряжении (избирательное устранение гармоник). Вторичные обмотки этих двух трансформаторов

включены последовательно таким образом, чтобы  $V_1 + V_2 = V_0$ . Запуск тиристоров второго инвертора запаздывает на угол  $\theta$  по отношению к запуску тиристоров первого инвертора. Форма выходного напряжения  $V_0$  может быть получена суммированием напряжений  $V_1$  и  $V_2$ . Форма выходного напряжения представляет собой 120-градусные квазипрямоугольные импульсы. На рис. 6.13в показаны векторные диаграммы основных и третьих гармоник выходных напряжений инверторов при угле запаздывания  $\theta = 60^\circ$ .

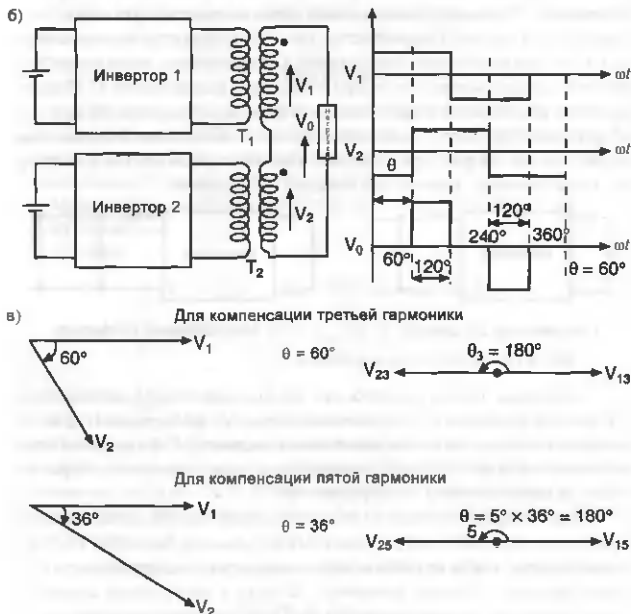


Рис. 6.13. б) Подключение нагрузки через трансформатор  
в) Векторная диаграмма

Напряжения третьих гармоник находятся в противофазе друг к другу. Поэтому в суммарном выходном напряжении инверторов третья

гармоника отсутствует. Выбрав угол запаздывания  $\theta = 36^\circ$ , можно компенсировать в выходном напряжении пятую гармонику. Недостатком этой схемы является то, что требуются два инвертора и два одинаковых трансформатора.

### 6.10.3. Использование фильтров

Различные типы используемых фильтров изображены на рис. 6.13г. В однозвенном  $LC$ -фильтре реактивное сопротивление индуктивности  $L$  с увеличением частоты увеличивается, то есть высокочастотные компоненты на выходе существенно ослабляются. С увеличением индуктивности  $L$  увеличиваются омические потери в фильтре. Конденсатор  $C$  обладает высоким реактивным сопротивлением на низких частотах, но при этом эффективно шунтирует высокочастотные компоненты. Оптимальный выбор элементов фильтра позволяет увеличить рабочий ток инвертора без существенного увеличения потерь в  $LC$ -фильтре.



Однозвенный  $LC$ -фильтр



Многозвенный  $LC$ -фильтр

Рис. 6.13г. Использование фильтров

Некоторая часть гармоник все же проходит через однозвенный  $LC$ -фильтр в нагрузку. Существенно улучшить фильтрацию гармоник можно с помощью использования многозвенных  $LC$ -фильтров. Размер индуктивности фильтра можно уменьшить, подключив его ко вторичной обмотке понижающего трансформатора.

Если инвертор работает на фиксированной частоте, можно использовать последовательный резонансный  $LC$ -фильтр. Значения  $L$  и  $C$  выбираются так, чтобы их собственная резонансная частота фильтра была равна выходной частоте инвертора. Фильтр и нагрузочное сопротивление работают как последовательный низкодобротный резонансный контур. Электрический ток в такой цепи находится в фазе с выходным напряжением, поэтому напряжение нагрузочного сопротивления синусоидально. Применение реактивных фильтров предпочтительно для высокочастотных устройств.

#### 6.10.4. Использование широтно-импульсной модуляции

Выход инвертора с широтно-импульсной модуляцией имеет полуволновую симметрию. Положительные и отрицательные площади выходного напряжения здесь равны. Поэтому в выходном напряжении четные гармоники отсутствуют. Гармоники высшего порядка допустимы, поскольку их величина мала и они не создают проблем. Нечетные гармоники и гармоники более низкого порядка можно существенно уменьшить или устранить использованием многократной широтно-импульсной модуляции.

#### Задачи

**6.1.** Инвертор Мак-Мюррея питается от источника постоянного тока напряжением 50 В. Выходное напряжение источника может изменяться на 4 %. Время выключения тиристора будем считать равным 25 мкс. Емкость конденсатора равна 50 мкФ.

Определите максимальный электрический ток, который может коммутироваться.

*Решение*

$$V_{\min} = 50 - (4\% \text{ от } 50) = 50 - 2 = 48 \text{ В};$$

$$C = \frac{0,89 I_{\text{от}} t_c}{V_{\min}} = \frac{0,89 \cdot I_{\text{от}} \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{48} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Поэтому  $I_{\text{от}} = 54 \text{ А}$ .

**6.2.** Инвертор Мак-Мюррея питается от источника постоянного тока напряжением 230 В. Выходное напряжение источника может изменяться на  $\pm 20\%$ . Электрический ток в течение времени коммутирования может измениться от 10 до 100 А. Время выключения тиристора будем считать равным 25 мкс. Вычислите значения  $L$  и  $C$ , используя запас прочности 2.

*Решение*

$$V = 230 - (20\% \text{ от } 230) = 230 - 46 = 184 \text{ В}, I = 100 \text{ А};$$

$$C = \frac{0,89 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{184} = 24,1 \text{ мкФ}.$$

$$L = \frac{0,89 t_c V_{\min}}{I_{\text{от}}} = \frac{0,39 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{184} = 35,8 \text{ мкГн}.$$

## Вопросы и ответы

1. Для питания устройств регулируемым напряжением с переменной частотой инвертор должен иметь возможность в процессе преобразования регулировать величину выходного напряжения и его частоту. Да или нет?

2. По каким признакам следует выбирать тиристоры для инверторов?

*Ответ*

а) Время выключения тиристора должно быть минимальным. Тиристоры следует использовать в составе низкочастотных инверторов. Для высокочастотных инверторов более пригодны биполярные или МОП-транзисторы.

б) Применяются приборы с высокими номинальными значениями параметра  $dv/dt$ .

в) Основные параметры тириستоров должны быть в 2—3 лучше, чем необходимо для конкретной схемы.

3. В некоторой цепи последовательно запускаются группы из трех тиристоров. Каков режим работы этого инвертора?

*Ответ.* 180-градусный режим работы.

4. Используются ли демпфирующие диоды в инверторах для передачи мощности обратно в источник питания?

5. Используется ли метод коммутирования напряжением в инверторе Мак-Мюррея — Бедфорда?

6. Источник постоянного тока создает ток 100 мА в нагрузке 1 кОм. Какой будет ток, когда сопротивление нагрузки изменится на 100 Ом?

*Ответ.* 100 мА.

7. Позволяет ли многократная широтно-импульсная модуляция уменьшить гармоники на выходе инвертора?

8. По сравнению с тиристорным инвертором с широтно-импульсной модуляцией в выходном напряжении транзисторного инвертора с широтно-импульсной модуляцией будет меньше гармоник, если применить в инверторе биполярные транзисторы. Да или нет?

9. Используется ли технология широтно-импульсной модуляции в инверторе для уменьшения гармонических составляющих и регулирования выходного напряжения?

10. Какова функция демпферных диодов в мостовом инверторе?

*Ответ.* Демпферные диоды передают запасенную реактивную мощность в нагрузку обратно в источник питания.





**11. Пригоден ли последовательный инвертор для работы на высоких частотах?**

**12. В синусоидальном широтно-импульсном модуляторе, чтобы уменьшить гармоники выходного напряжения, коэффициент модуляции сохраняется  $< 1$ . Да или нет?**

**13. В последовательном инверторе максимально возможная рабочая частота может быть ниже резонансной частоты из-за наличия зоны нечувствительности. Да или нет?**

**14. Какой самый простой метод устранения третьей гармоники в трехфазных инверторах?**

*Ответ.* Используйте 120-градусный режим работы и нагрузку в форме звезды.

**15. Приведите преимущества и недостатки транзисторного инвертора по сравнению с тиристорным инвертором.**

*Ответ*

Преимущества:

- 1) возможен высокочастотный режим;
- 2) высокое быстродействие и меньшая величина гармоник;
- 3) не требуются цепи коммутирования.

Недостатки:

- 1) требуется управляющая схема;
- 2) должен протекать непрерывный базовый ток во время открытого состояния транзистора.

## ГЛАВА 7

# ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 7.1. Введение

Источник с фиксированным напряжением постоянной частоты можно преобразовать в источник с регулируемым напряжением и частотой с помощью системы выпрямителя-инвертора. Недостатки такой системы заключаются в том, что требуются две ступени преобразования, что увеличивает суммарные потери.

Преобразование фиксированного напряжения постоянной частоты в источник с регулируемым напряжением частотой можно осуществить с помощью частотного преобразователя без использования промежуточного звена постоянного тока.

Частотные преобразователи классифицируются как: 1) понижающие частотные преобразователи; 2) повышающие частотные преобразователи. В понижающих частотных преобразователях выходная частота меньше, чем входная. В повышающих частотных преобразователях выходная частота больше, чем входная.

### 7.2. Однофазный понижающий частотный преобразователь

Понижающий частотный преобразователь состоит из двух соединенных друг с другом двухполупериодных преобразователей, как показано на рис. 7.1. В любой промежуток времени только один преобразователь находится в рабочем режиме. Когда  $P$ -преобразователь работает, на нагрузку появляются положительные выпрямленные сегменты. Когда  $N$ -преобразователь находится в рабочем состоянии, на нагрузку

появляются отрицательные выпрямленные сегменты. На рис. 7.1б видно, что выходная частота частотного преобразователя составляет  $1/3$  от значения входной частоты. Чтобы уменьшить гармонические составляющие на выходе, следует выбрать меньшую задержку угла включения тиристора для среднего импульса и большее время задержки для двух других импульсов.

Включая тиристоры два раза за время одного полупериода входного напряжения, получим выходную частоту в два раза меньше входной частоты. Таким образом, выходная частота может изменяться в зависимости от количества управляющих импульсов за один полупериод.

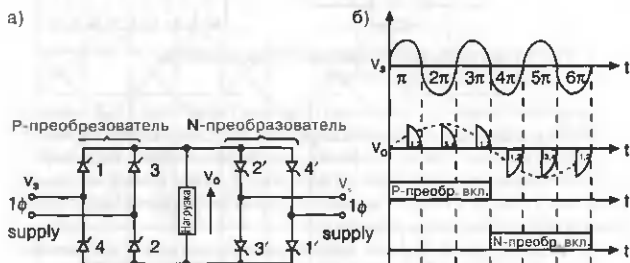


Рис. 7.1. а) Понижающий частотный преобразователь;

б) Формы напряжений

Выходное напряжение частотного преобразователя можно регулировать путем изменения времени задержки включения тиристоров.

Недостатки.

1. Выходное напряжение содержит гармонические составляющие.
2. Плавное изменение выходной частоты невозможно.
3. Необходима сложная цепь управления.
4. Значение выходной частоты является кратным значением входной частоты.

### 7.3. Повышающий частотный преобразователь

Электрическая схема и формы выходных сигналов повышающего частотного преобразователя показаны на рис. 7.2. Выходная частота повышающего частотного преобразователя выше, чем входная. В этой

схеме используются две ветви встречно включенных тиристоров и трансформатор с отводом от центра обмотки.

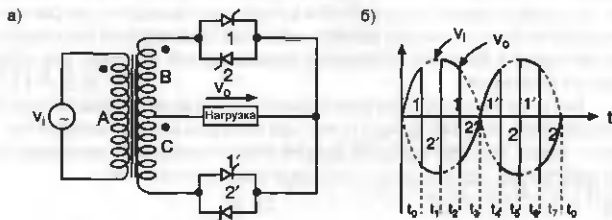


Рис. 7.2. а) Повышающий частотный преобразователь;  
б) Формы напряжений

В течение положительного полупериода тиристоры  $1$  и  $2'$  смещены в прямом направлении. В момент времени  $t = t_0$  запускается тиристор  $1$  и остается в проводящем состоянии до момента запуска тиристора  $2'$ . В момент времени  $t_1$  запускается тиристор  $2'$  и тем самым выключает тиристор  $1$ . Затем в момент времени  $t_2$  снова запускается тиристор  $1$ , а тиристор  $2'$  выключается и так далее.

В течение отрицательного полупериода тиристоры  $1'$  и  $2$  смещены в прямом направлении. Тиристоры запускаются в последовательности  $1' - 2 - 1' - 2$ , и аналогичный процесс повторяется.

Следует заметить, что в данном случае частота входного напряжения в четыре раза ниже частоты выходного напряжения. Недостатком этой схемы является необходимость в принудительной коммутации тириستоров.

#### 7.4. Частотный преобразователь трехфазного напряжения в однофазное

Электрическая схема, приведенная на рис. 7.3, преобразует трехфазное напряжение в однофазное. Данная схема есть не что иное как комбинация двух трехфазных преобразователей. В любой момент времени работает только один из преобразователей. В течение положительного полупериода выходного напряжения работает  $P$ -преобразователь, а в течение отрицательного —  $N$ -преобразователь. Преобразование входного напряжения в течение одного периода в выходное происходит за шесть циклов.

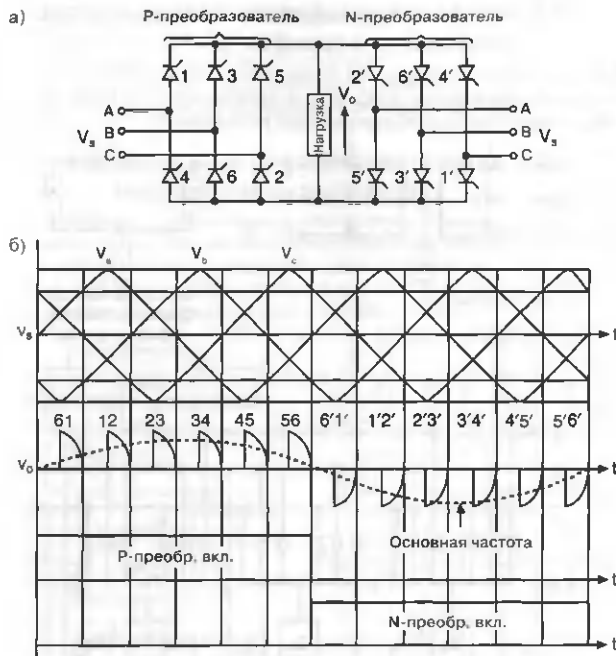


Рис. 7.3. а) Понижающий частотный преобразователь;  
б) Формы напряжений

Когда  $N$ -преобразователь находится в активном состоянии, выходное напряжение отрицательное. На рис. 7.3б видно, что цикл преобразования происходит за два периода входного напряжения. Поэтому частота выходного напряжения составляет половину частоты входного напряжения.

Недостатком такой схемы является наличие гармонических составляющих в выходном напряжении и использование большого количества тиристоров.

### 7.5. Частотный преобразователь трехфазного напряжения в трехфазное

В схеме, показанной на рис. 7.4, используются три соединенных друг с другом преобразователя. Каждый блок преобразователей представляет собой трехфазный однополупериодный выпрямитель.

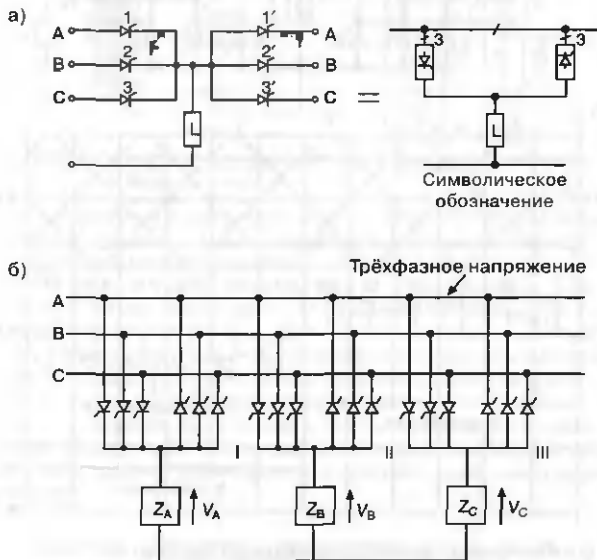


Рис. 7.4. а) Трёхфазный выпрямитель и его символическое обозначение; б) Частотный преобразователь трехфазного напряжения в трехфазное

Компенсационный преобразователь преобразует трехфазное напряжение в трехфазное по вышеизложенному принципу (преобразование трехфазного напряжения в однофазное).

Тиристоры блока II управляются с запаздыванием на  $120^\circ$  по отношению к блоку I, поэтому напряжение фазы В запаздывает на  $120^\circ$  по отношению к напряжению фазы А.

Соответственно, тиристоры блока III управляются с запаздыванием на  $120^\circ$  по отношению к блоку II.

Силовая цепь этой схемы довольно сложна, в ней задействовано 18 тиристоров. Такая схема используется для управления скоростью вращения низкооборотных трехфазных асинхронных электродвигателей.

## 7.6. Частотные преобразователи однофазного напряжения в трехфазное

Электропитание локомотивов осуществляется от однофазной сети. Однофазное напряжение можно преобразовать в трехфазное управляемое напряжение питания асинхронного электродвигателя. Такая система может быть использована вместо фазоуправляемого выпрямителя в комбинации с электродвигателем постоянного тока.

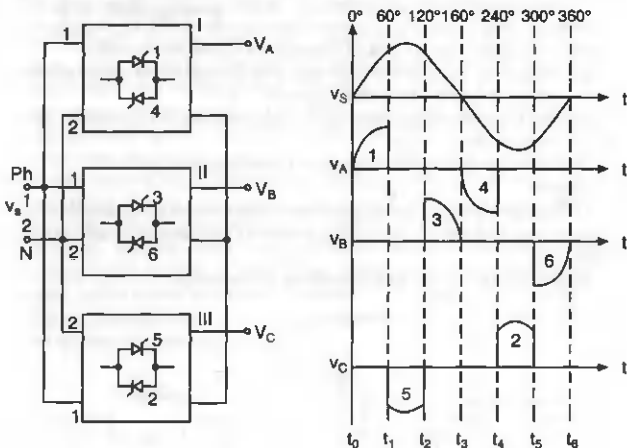


Рис. 7.5. Частотный преобразователь однофазного напряжения в трехфазное

В схеме, показанной на рис. 7.5, используются три коммутатора переменного тока. Тиристор 1, включенный в фазу A, включается в момент времени  $t_0$  и принудительно выключается в момент времени  $t_1$  за счет включения тиристора 5. Аналогичным образом производится

управление тиристорами в фазах В и С с задержкой на 120 и 240°, соответственно, по отношению к фазе А.

Напряжение на фазе С обратно по отношению ко входному напряжению, что позволяет получить на выходе трехфазное напряжение при однофазном входном напряжении. В целях минимизации гармонических составляющих выходные напряжения преобразователя необходимо отфильтровать.

## Вопросы и ответы

1. Каково соотношение между входной и выходной частотами понижающего частотного преобразователя?

*Ответ.* В понижающем частотном преобразователе выходная частота связана с входной частотой как  $f_0 = f_i/n$ .

2. В чём недостаток повышающего частотного преобразователя?

*Ответ.* Это устройство требует принудительной коммутации, и выходное напряжение содержит гармоники основной частоты.

3. Почему частотные преобразователи трехфазного напряжения в трехфазное не распространены широко?

*Ответ.* В схеме этого устройства задействованы 18 тириستоров. Цепь запуска тириستоров сложна.

4. В чём преимущества частотных преобразователей?

*Отвечает*

1) Они преобразуют фиксированное переменное напряжение с постоянной частотой в переменное напряжение с регулируемой амплитудой и частотой.

2) Потери частотных преобразователей меньше.



## ГЛАВА 8

# КОММУТАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 8.1. Введение

Коммутаторы переменного тока преобразуют фиксированное переменное напряжение с заданной частотой в регулируемое переменное напряжение с той же частотой. Эти коммутаторы также называются регуляторами напряжения переменного тока или двунаправленными коммутаторами переменного тока. Коммутаторы переменного тока могут использоваться в нагревательных приборах, сварочных аппаратах, аппаратах пуска и управления скоростью вращения асинхронных электродвигателей. В этой главе рассматриваются коммутаторы переменного тока с резистивной и индуктивно-резистивной нагрузкой.

На рис. 8.1 показана схема однополупериодного однофазного регулятора напряжения. В этой схеме отсутствует возможность регулирования напряжения по отрицательному полупериоду. Следовательно, выходное напряжение в этом случае несимметричное и в нем присутствуют четные гармоники.

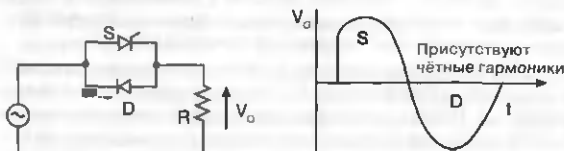


Рис. 8.1. Однополупериодный однофазный регулятор напряжения

На рис. 8.2 показана схема однофазного двунаправленного коммутатора с одним тиристором. В течение положительного полупериода диоды

$D_1$  и  $D_2$  находятся в проводящем состоянии, если в этот момент времени тиристор  $S$  находится в проводящем состоянии. В течение отрицательного полупериода диоды  $D_3$  и  $D_4$  находятся в проводящем состоянии, если в этот момент времени тиристор  $S$  находится в проводящем состоянии. Падение напряжения в этой схеме повышенное по отношению к однофазному регулятору, так как в каждом полупериоде последовательно с нагрузкой включены дополнительно два диода, смещенных в прямом направлении.

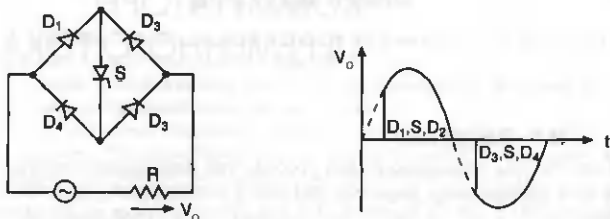


Рис. 8.2. Коммутатор переменного тока с одним тиристором

## 8.2. Коммутатор переменного тока с использованием симистора

Схема коммутатора переменного тока показана на рис. 8.3. Так как эта схема коммутирует напряжение положительного и отрицательного полупериода, она называется коммутатором переменного тока или двунаправленным коммутатором. В этой схеме управление симистором осуществляется с помощью динистора. В течение положительного полупериода входного напряжения обкладка  $a$  конденсатора  $C$  заряжена положительно, а обкладка  $b$  отрицательно. Динистор остается выключенным до тех пор, пока напряжение на конденсаторе меньше, чем напряжение включения динистора  $V_{B1}$ . Когда напряжение на конденсаторе увеличивается до значения  $V_{B1}$ , динистор пробивается и начинает проводить ток. Напряжение заряженного конденсатора прикладывается между управляющим электродом симистора  $G$  и электродом  $MT_1$ . Симистор переходит во включенное состояние при достижении угла  $\alpha$ , и на нагрузке появляется напряжение.

Симистор выключается при  $\theta = \pi$ , поскольку ток через него уменьшается до нуля.

Как показано на рис. 8.3б, в последовательной  $RC$ -цепи происходит задержка напряжения  $V_C$  по отношению к напряжению  $V_S$  на угол  $\theta_1$ .

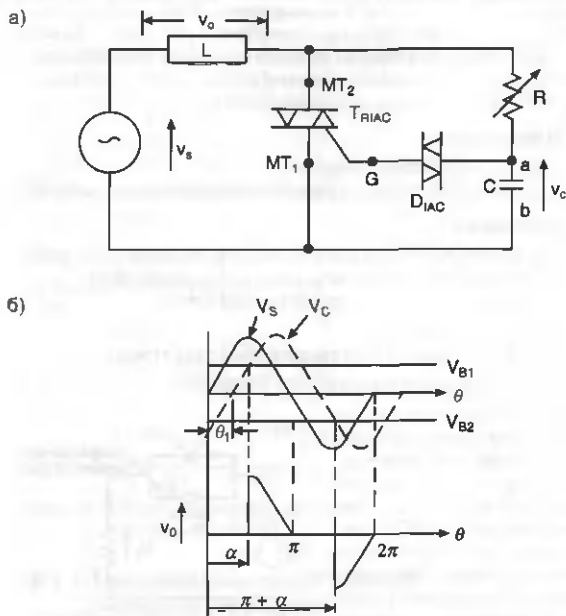


Рис. 8.3. а) Коммутатор переменного тока с использованием тиристора;  
б) Формы напряжений в случае резистивной нагрузки

В течение отрицательного полупериода входного напряжения обкладка  $b$  конденсатора заряжена положительно, а обкладка  $a$  — отрицательно. Динистор остается выключенным до тех пор, пока напряжение на конденсаторе меньше, чем напряжение включения динистора  $V_{B2}$ . Когда динистор переходит в проводящее состояние, отрицательное напряжение заряженного конденсатора прикладывается между управляющим электродом симистора  $G$  и электродом  $MT_1$ . Симистор переходит во включенное состояние.

Напряжение на нагрузке является частью периода напряжения питания. Задержкой угла включения симистора можно управлять путем изменения сопротивления  $R$  или емкости  $C$ . В рассматриваемой схеме управление углом включения осуществляется резистором  $R$ . Очевидно, что участок «вольт-секундной» площади выходного напряжения больше, когда угол  $\alpha$  мал, и наоборот. Таким образом, среднее значение выходного напряжения зависит от значения угла  $\alpha$ .

### Преимущества

1. Меньшие потери мощности.
2. Возможность плавного регулирования выходного напряжения.

### Недостатки

1. В выходном напряжении присутствуют гармоники, поскольку выходное напряжение не является чисто синусоидальным.
2. Эта схема создает электромагнитные помехи.

## 8.3. Коммутатор переменного тока с резистивной нагрузкой

Формы напряжений в схеме коммутатора переменного тока с резистивной нагрузкой приведены на рис. 8.4. При  $\theta = \alpha$  тиристор  $T_1$  включается.  $T_1$  находится в проводящем состоянии вплоть до того, пока угол  $\theta$  не будет равен  $\pi$ . Выходное напряжение и ток коммутатора сфазированы, так как нагрузка резистивная. При  $\theta = \pi$  тиристор  $T_1$  выключается, поскольку ток, протекающий через него, уменьшается до нуля. При  $\theta = \pi + \alpha$  включается тиристор  $T_2$  и находится в проводящем состоянии вплоть до того, пока угол  $\theta$  не будет равен  $2\pi$ . Этот процесс повторяется, таким образом через нагрузку протекает коммутированный переменный ток.

Когда любой из тиристорov находится в проводящем состоянии, напряжение на обоих тиристорах равно нулю. Когда оба тиристора находятся в выключенном состоянии, напряжение на обоих тиристорах равно напряжению питания.

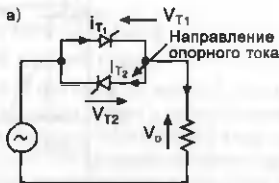


Рис. 8.4. Коммутатор переменного тока с резистивной нагрузкой.  
а) Схема

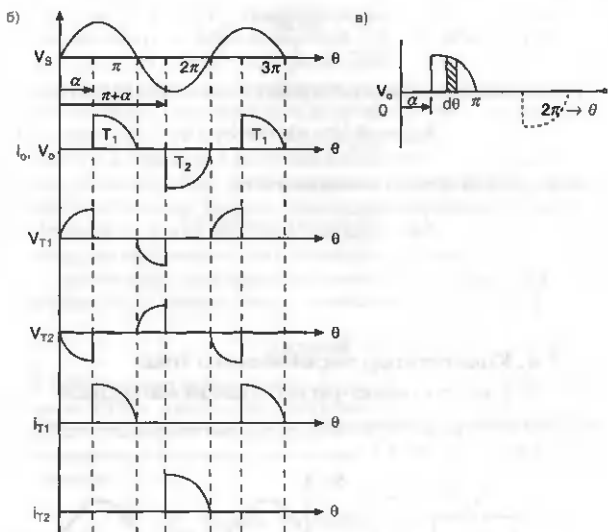


Рис. 8.4. б) Формы напряжений и токов;  
в) Сегмент напряжения

### 8.3.1. Среднеквадратическое значение выходного напряжения

Количество тепла, выделяемое на нагрузке в течение положительного полупериода, такое же, как и в течение отрицательного полупериода, так как площади положительных и отрицательных сегментов напряжений равны. Следовательно, чтобы найти площадь сегмента напряжения, достаточно будет проинтегрировать квадрат выходного положительного напряжения на интервале от  $\alpha$  до  $\pi$ , как показано на рис. 8.4в.

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v^2 d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta = \frac{V_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \theta d\theta = \frac{V_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{(1 - \cos 2\theta)}{2} d\theta;$$

$$V_{rms}^2 = \frac{V_m^2}{2\pi} \int (1 - \cos 2\theta) d\theta = \frac{V_m^2}{2\pi} \left[ \theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m^2}{2\pi} [(\pi - \alpha) - (0 - \sin 2\alpha)/2].$$

После извлечения квадратного корня из обеих частей получим:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha)/2]^{\frac{1}{2}}. \quad (8.1)$$

Аналогичным образом можно получить:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2\pi}} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha)/2]^{\frac{1}{2}}, \quad (8.2)$$

где  $I_m = \frac{V_m}{R}$ .

#### 8.4. Коммутатор переменного тока с индуктивно-резистивной нагрузкой

Схема коммутатора переменного тока с индуктивно-резистивной нагрузкой показана на рис. 8.5.

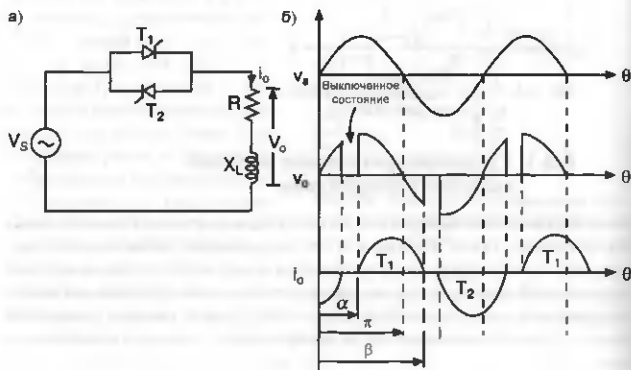


Рис. 8.5. а) Схема коммутатора переменного тока с индуктивно-резистивной нагрузкой;  
б) Формы напряжений и токов

Допустим, что  $\varphi$  — угол запаздывания между напряжением и током нагрузки. Тогда минимальное значение угла включения коммутатора переменного тока с индуктивно-резистивной нагрузкой равно  $\varphi$ . Выходным напряжением можно управлять, если угол включения тиристоров больше угла  $\varphi$ . Если тиристоры включаются при  $\alpha = \varphi$ , на нагрузке присутствует полное синусоидальное напряжение.

При  $\theta = \alpha$  тиристор  $I$  включается и находится в проводящем состоянии до значения угла  $\beta$ . На интервале от  $\pi$  до  $\beta$  ток через тиристор поддерживается за счет энергии, запасенной в индуктивности нагрузки. На интервале от  $\alpha$  до  $\pi$  мощность передается от источника питания в нагрузку, а на интервале от  $\pi$  до  $\beta$  от нагрузки обратно в источник питания. С увеличением угла  $\alpha$  время выключенного состояния коммутатора увеличивается, а с уменьшением — уменьшается.

## Задачи

**8.1.** Коммутатор переменного тока работает на нагрузочное сопротивление 400 Ом, напряжение источника питания переменного тока 110 В. Если угол включения тиристоров составляет  $60^\circ$ , то каково среднеквадратическое выходное напряжение?

*Решение*

$$V_{rms} = 110 \text{ В}; R = 400 \text{ Ом}; \alpha = 60^\circ;$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100}{\sqrt{2\pi}} [(\pi - \pi/3) + (\sin 120^\circ / 2)] = 88,5 \text{ В}.$$

**8.2.** Докажите, что форм-фактор коммутатора переменного тока с резистивной нагрузкой определяется выражением:

$$\frac{\sqrt{\pi}}{1 + \cos \alpha} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)]^{\frac{1}{2}}$$

*Решение*

$$\text{Среднее значение тока} = \frac{\text{Область}}{\text{Основы}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int i d\theta = \frac{I_m}{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta = \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha).$$

$$i_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i^2 d\theta = \frac{I_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \theta d\theta;$$

$$i_{\text{rms}} = \left[ \frac{I_m^2}{2\pi} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)] \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{I_m}{2\sqrt{\pi}} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)]^{\frac{1}{2}};$$

$$\text{Форм-фактор} = \frac{\text{Среднеквадратическое значение}}{\text{Среднее значение}} =$$

$$= i_{\text{rms}} / I_{\text{av}} = \frac{\sqrt{\pi}}{1 + \cos \alpha} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)]^{\frac{1}{2}}.$$

**8.3.** Однофазный коммутатор переменного тока работает на резистивную нагрузку 10 Ом, напряжением источника питания 230 В с частотой 50 Гц. Угол включения тиристоров изменяется от 0 до 180°. Вычислите:

а) максимальное среднеквадратическое значение и среднее значение тока тиристоров;

б) максимальное значение  $di/dt$ .

*Решение*

$R = 10 \text{ Ом}; V = 230 \text{ В}$

а) Наибольшие среднеквадратическое значение и среднее значение достигаются при  $\alpha = 0^\circ$ .

$$i_{\text{T rms}} = \frac{I_m}{\sqrt{2\pi}} [(\pi - \alpha) + (\sin 2\alpha / 2)]^{\frac{1}{2}};$$

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{\sqrt{2}V}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{10} = 23 \cdot \sqrt{2}$$

Если  $\alpha = 0^\circ$ , то среднее значение тока будет:

$$i_{\text{T rms}} = \frac{I_m}{2\sqrt{\pi}} (\pi)^{\frac{1}{2}};$$

$$i_{\text{T rms}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 23}{2\sqrt{\pi}} (\pi)^{\frac{1}{2}} = 16,27 \text{ А.}$$

При  $\alpha = 0^\circ$  получим  $I_{\text{TAV}}$ :

$$I_{\text{TAV}} = \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{23\sqrt{2}}{2\pi} (1 + 1) = 10,3 \text{ А.}$$

б) Если  $\alpha = 90^\circ$ , то значение  $di/dt = \infty$ , потому что  $\text{tg } 90^\circ = \infty$ . Теоретически скорость нарастания тока бесконечно большая.



## Вопросы и ответы

**1. Может ли симистор заменить тиристоры в коммутаторе переменного тока?**

**2. Каковы области применения коммутаторов переменного тока?**

*Ответ*

а) Регулирование скорости вращения электродвигателей переменного тока.

б) Питание электронагревательных приборов.

в) Электросварка.

г) Управление реактивной мощностью.

**3. Требуется ли гальваническая развязка между цепями управления двух тиристоров в однофазном коммутаторе переменного тока?**

*Ответ.* Да.

## ГЛАВА 9

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

### 9.1. Введение

В этой главе кратко обсуждаются наиболее типичные случаи применения силовых полупроводниковых приборов.

### 9.2. Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя

Скорость вращения асинхронного электродвигателя может регулироваться следующими методами:

- а) регулированием напряжения;
- б) регулированием частоты напряжения;
- в) регулированием сопротивления ротора;
- г) схемой регенерации мощности.

#### 9.2.1. Регулирование изменением напряжения

Известно, что угловая скорость вращения ротора определяется как:

$$N = N_s(1 - S),$$

где:  $N_s$  — угловая скорость вращения магнитного поля двигателя;  
 $S$  — коэффициент скольжения, определяющий величину отставания скорости вращения ротора от магнитного поля.

Соответственно:

$$N = \frac{120f}{P}(1 - S),$$

где  $f$  — частота питающей сети;  $P$  — число пар полюсов в двигателе.

Тогда крутящий момент на валу двигателя определяется как:

$$T = \frac{KSE_2^2 r_2}{r_2^2 S + S^2 x_2^2}, \quad (9.1)$$

где:  $K$  — коэффициент пропорциональности, определяющий зависимости между магнитным потоком и наведёнными ЭДС в обмотках статора и ротора;  $r_2$  — активное сопротивление обмотки ротора;  $x_2$  — индуктивное сопротивление обмотки ротора.

Обычно величина  $s^2 x_2^2$  настолько мала, что ею можно пренебречь, тогда:

$$T = \frac{KSE_2^2 r_2}{r_2} = \frac{KSV^2}{r_2}, \text{ или } S = \frac{TR_2}{KV^2},$$

или  $T \sim V^2$ , а  $S \sim \frac{1}{V^2}$ ,

где  $V$  — напряжение питания электродвигателя.

Из (9.1) следует, что крутящий момент электродвигателя пропорционален  $V^2$ . Если напряжение питания электродвигателя уменьшить в два раза, его крутящий момент уменьшится в четыре раза.

Из (9.1) следует, что коэффициент скольжения обратно пропорционален  $V^2$ . Другими словами, скорость вращения электродвигателя прямо пропорциональна квадрату напряжения питания. Схема управления скоростью вращения электродвигателя и формы сигналов показаны на рис. 9.1.

Простейший метод регулирования частоты вращения асинхронного двигателя — изменение его напряжения питания в каждой фазе с помощью коммутатора переменного тока. Частоту вращения можно уменьшить, увеличивая угол включения тиристоров, и наоборот. В трехфазном коммутаторе переменного тока два тиристора находятся в проводящем состоянии одновременно. При этом в проводящем состоянии находится один тиристор из нечетной группы и один из четной группы. Тиристоры включаются в последовательности 61, 12, 23, 34, 45, 56 и т. д. Чтобы реализовать такую последовательность включения, надо так пронумеровать тиристоры, чтобы разность их номеров в каждой антипараллельной паре была равна трем.

В течение времени выключенного состояния на клеммах электродвигателя присутствует только электродвижущая сила, так как электрический ток в цепи равен нулю.

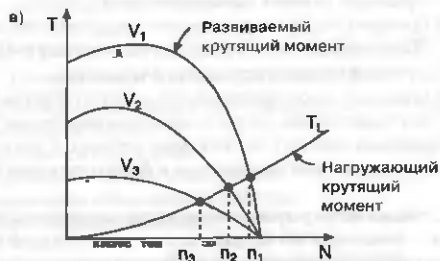
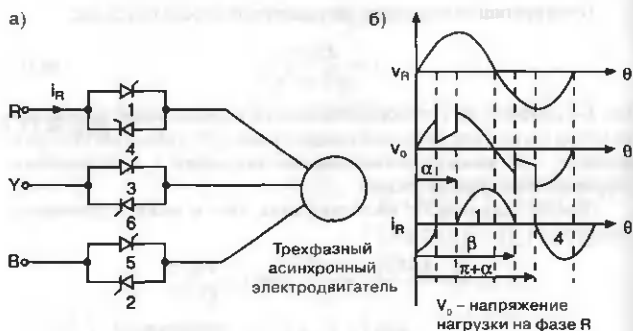


Рис. 9.1. а) Схема тиристорного регулятора;  
 б) Формы напряжений и тока;  
 в) Механические характеристики асинхронного электродвигателя при регулировании напряжением

### Преимущества

1. Возможность плавного изменения частоты вращения.
2. Экономия электроэнергии.

### Недостатки

1. Присутствуют гармоники в цепи питания электродвигателя.
2. Большой уровень электромагнитных помех.

### 9.2.2. Регулирование изменением частоты напряжения

Эквивалентная схема асинхронного электродвигателя аналогична схеме трансформатора. Магнитный поток в статоре электродвигателя пропорционален отношению  $V/f$ . Если напряжение питания электродвигателя остается постоянным, а его частота уменьшается, величина магнитного потока в статоре увеличивается и может достичь предельного значения. Таким образом, напряжение и частота должны изменяться таким образом, чтобы отношение  $V/f$  оставалось постоянным во всем рабочем диапазоне. При увеличении напряжения питания частота также должна увеличиваться, и наоборот.

Регулируемое по частоте и величине напряжение, необходимое для управления частотой вращения асинхронного электродвигателя, обеспечивается с помощью системы, состоящей из выпрямителя и инвертора, как показано на рис. 9.2.

Получение регулируемого напряжения обеспечивается с помощью трехфазного двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя, как показано на рис. 9.2а(1). Выпрямитель с емкостным фильтром работает как источник с регулируемым напряжением. Трехфазный инвертор напряжения преобразует регулируемое постоянное напряжение в переменное напряжение с регулируемой частотой. Инвертор может работать в 120- или в 180-градусном режимах.

Диодный выпрямитель преобразует фиксированное переменное напряжение в фиксированное постоянное напряжение, как показано на рис. 9.2а(2). Трехфазный инвертор с широтно-импульсной модуляцией преобразует фиксированное постоянное напряжение в регулируемое по частоте и величине переменное напряжение. Это напряжение используется для регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя.

На рис. 9.2а(3) показан трехфазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель с последовательно включенной индуктивной нагрузкой. Такая схема работает как управляемый источник постоянного тока. Трехфазный инвертор тока преобразует постоянный ток в переменный с регулируемой частотой, с помощью которого можно управлять частотой вращения асинхронного электродвигателя.

Характеристики крутящего момента асинхронного электродвигателя, управляемого частотой питающего напряжения, показаны на рис. 9.2б. Эти характеристики приведены для различных частот. Основная частота  $f_0$ , умноженная на коэффициент  $K$ , соответствует номинальному напряжению. До достижения основной частоты напряжение

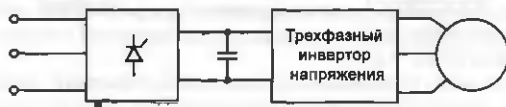
и частота увеличиваются одновременно. Магнитный поток в статоре электродвигателя при этом постоянный, и поэтому крутящий момент:

$$T \sim \frac{V^2}{N}$$

тоже постоянный. Частота вращения электродвигателя увеличивается с увеличением частоты напряжения питания. Механическая энергия увеличивается линейно, поскольку частота вращения также увеличивается линейно.

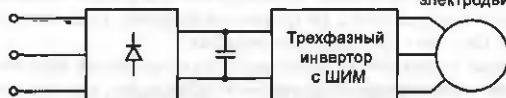
- 1) Трехфазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель

Трехфазный асинхронный электродвигатель



- 2) Диодный выпрямитель

Трехфазный асинхронный электродвигатель



- 3) Трехфазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель

Трехфазный асинхронный электродвигатель

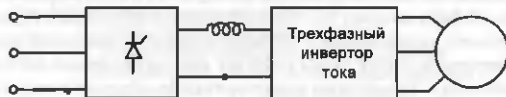


Рис. 9.2а. Схемы регулирования изменением частоты напряжения:

- 1) Схема питания асинхронного электродвигателя трехфазным инвертором напряжения;
- 2) Схема питания асинхронного электродвигателя трехфазным инвертором с широтно-импульсной модуляцией;
- 3) Схема питания асинхронного электродвигателя трехфазным инвертором тока

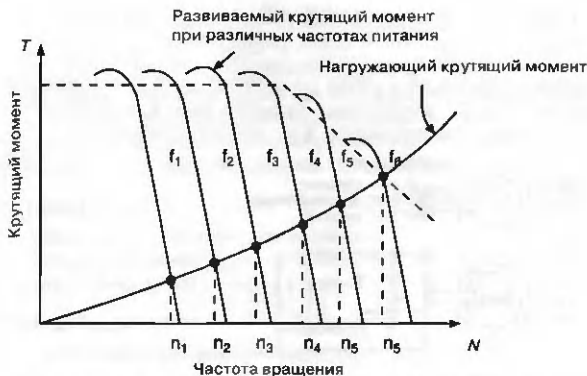


Рис. 9.26. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании изменением частоты напряжения

Величина напряжения питания поддерживается на номинальном уровне при увеличении его частоты сверх основной. Следовательно, чтобы увеличить частоту вращения электродвигателя, надо увеличить только частоту его напряжения питания. Магнитный поток в статоре при этом уменьшается, что приводит к уменьшению крутящего момента. Но частота вращения электродвигателя увеличивается, следовательно, его механическая энергия остается постоянной. Зависимости крутящего момента от частоты вращения при различных частотах питания и нагрузочная характеристика показаны на рис. 9.26. Рабочей точкой является точка пересечения этих характеристик, определяющая частоту вращения электродвигателя.

### 9.2.3. Регулирование изменением сопротивления в цепи ротора

Для изменения сопротивления в цепи ротора обычно используется дополнительное, последовательно включенное, калиброванное сопротивление. Недостатками такого метода регулирования являются искробразование при коммутации дополнительного сопротивления и сложность технического обслуживания.

Изменять сопротивление ротора можно с помощью коммутатора, включенного в цепи ротора. Схема коммутатора постоянного тока в цепи ротора асинхронного электродвигателя показана на рис. 9.3(а). Переменное напряжение в цепи ротора преобразуется в постоянное с помощью диодного выпрямителя. Сопротивление  $R_1$  является токоограничивающим сопротивлением, а  $R_2$  — коммутируемым.

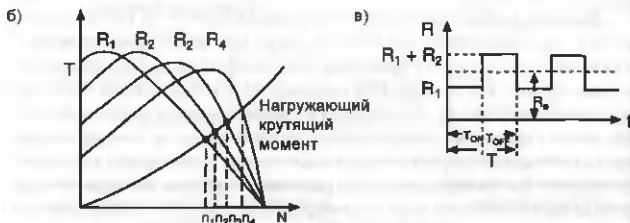
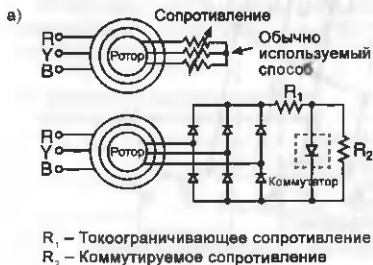


Рис. 9.3. а) Схема регулирования изменением сопротивления в цепи ротора;  
 б) Механические характеристики;  
 в) Диаграмма изменения сопротивления ротора

Среднее значение сопротивления ротора можно определить из графика, приведенного на рис. 9.3в.

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{R_1 T_{on} + (R_1 + R_2) T_{off}}{T} = \frac{R_1 T_{on} + R_1 T_{off} + R_2 T_{off}}{T} = \\
 &= \frac{R_1 (T) + R_2 T_{off}}{T} = R_1 + R_2 (T_{off} / T) = R_1 + R_2 \frac{(T - T_{on})}{T} = \\
 &= R_1 + R_2 (1 - T_{on} / T)
 \end{aligned} \quad (9.2)$$



$$R_c = R_1 - R_2(1 - \delta),$$

где  $\delta$  — скважность включения коммутатора. Регулируя скважность включения коммутатора  $\delta$ , можно регулировать среднее значение сопротивления ротора и тем самым частоту вращения электродвигателя. На рис. 9.36 приведено семейство характеристик крутящего момента от частоты вращения при различных скважностях включения коммутатора или для различных значений среднего сопротивления ротора.

### Преимущества

1. Возможна плавная регулировка скорости вращения.
2. Возможно применение системы обратной связи для стабилизации крутящего момента или скорости вращения.

### Недостатки

1. Для работы управления коммутатором требуются дополнительная схема.
2. Переменный ток ротора содержит гармонические составляющие, в результате чего в нем выделяется дополнительное тепло.
3. В схеме коммутатора необходим тиристор с большим рабочим напряжением.

## 9.2.4. Схема регенерации потерь мощности в роторе

Известно, что для асинхронного электродвигателя можно записать:

$$\frac{\text{Мощность, отдаваемая ротором}}{\text{Мощность, принимаемая ротором}} = 1 - S,$$

где  $S$  — коэффициент скольжения.

$$\frac{P_o}{P_i} = (1 - S), P_o = P_i(1 - S) = P_i - SP_i$$

Величина  $SP_i$  называется мощностью потерь в роторе за счет скольжения.

Блок-схема регенерации мощности потерь в роторе за счет скольжения приведена на рис. 9.4. Эффективность регулирования частоты вращения путем изменения сопротивления ротора низкая, так как мощность потерь в роторе за счет скольжения рассеивается во внешней цепи. Эффективность регулирования существенно уменьшается при низких скоростях вращения или больших значениях коэффициентов скольжения.

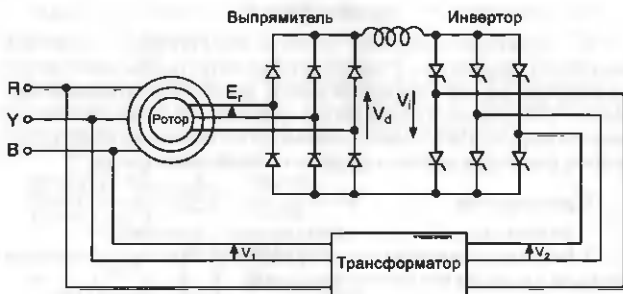


Рис. 9.4. Статическая система Краммера

Мощность потерь в роторе за счет скольжения можно с помощью трехфазного инвертора вернуть обратно в источник переменного тока. Низковольтное и низкочастотное напряжение ротора преобразуется в постоянный ток с помощью неуправляемого выпрямителя. Постоянный ток, в свою очередь, с помощью трехфазного инвертора тока преобразуется в переменный ток, и через трансформатор возвращается обратно в источник питания.

Схема, показанная на рис. 9.4, называется статической системой Краммера. Двухполупериодный инвертор работает при значении угла  $\alpha$  больше  $90^\circ$ , то есть, в диапазоне углов от  $90$  до  $180^\circ$ . Направление передачи мощности невозможно поменять, поскольку постоянный ток выпрямителя не может быть преобразован в переменный ток ротора.

Применим теорему Кирхгофа для цепи тока. Пренебрегая сопротивлением индуктивного фильтра, можно записать:

$$V_d + V_1 = 0; \quad V_d = -V_1; \quad (9.3)$$

$$1,35 E_r = -1,35 V_1 \cos \alpha;$$

$$E_r = S \cdot E_2 = -V_1 \cos \alpha;$$

$$S = -\frac{V_1}{E_2} \cos \alpha;$$

$$S = -a \cos \alpha,$$

где  $a = V_1/E_2$ .

Из уравнения (9.3) следует, что коэффициент скольжения и частота вращения могут регулироваться путем изменения угла управления  $\alpha$ . Такая схема называется схемой управления скоростью вращения электродвигателя путем регулирования инжекции электродвижущей силы в роторе или статической системой Краммера.

### 9.3. Торможение асинхронного двигателя

На практике применяются три способа торможения:

- 1) торможение противовключением;
- 2) торможение динамическим способом;
- 3) регенеративное торможение.

#### 9.3.1. Торможение противовключением

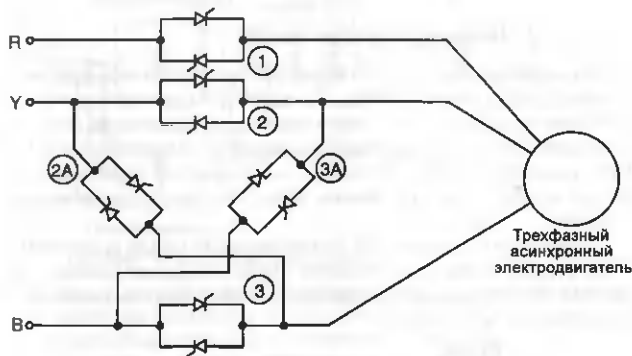


Рис. 9.5. Полупроводниковая схема торможения способом противовключения

Схема, используемая для торможения способом противовключения, изображена на рис. 9.5. При нормальных рабочих условиях тиристорные ключи 1, 2, 3 коммутируются управляющими импульсами в последовательности RYB. Управляющие импульсы на ключи 2А и 3А не поступают. В режиме торможения управляющие импульсы тиристорных ключей 2 и 3 блокируются и подаются на ключи 2А и 3А.

В этом режиме последовательность коммутирования фаз RBY. Направление вращения магнитного поля в статоре меняется на обратное. Вследствие механической инерции скорость вращения ротора не может измениться мгновенно. Скорость вращения ротора постепенно уменьшается до нуля, и далее ротор начинает вращаться в противоположном направлении. Чтобы предотвратить вращение ротора в противоположном направлении, отключается питание электродвигателя в момент нулевой скорости ротора. Этим способом обеспечивается быстрое торможение.

### Недостатки

1. Большие механические нагрузки на роторе.
2. Требуются тиристоры с более высокими рабочими токами.
3. Большие потери мощности.

### 9.3.2. Динамическое торможение

Асинхронный электродвигатель можно затормозить путем подачи постоянного тока на обмотки статора. Динамическое торможение достигается путем отключения трехфазного переменного напряжения питания электродвигателя с последующей подачей на него постоянного тока. При вращении ротора в постоянном магнитном поле возникает тормозной момент. Подобным образом тормозится диск в электрическом счетчике.

Динамическое торможение электродвигателя можно осуществить путем регулирования сопротивления в цепи ротора, как показано на рис. 9.6а. Частоту вращения ротора можно уменьшить путем увеличения сопротивления в его цепи.



Рис. 9.6а. Динамическое торможение дополнительным сопротивлением в цепи ротора

### 9.3.3. Регенеративное торможение

**Источником питания асинхронного электродвигателя является инвертор напряжения**

Когда асинхронный электродвигатель находится в рабочем режиме, подключенный к источнику питания преобразователь работает как выпрямитель, а инвертор напряжения, являясь источником питания асинхронного электродвигателя, работает как источник переменного трехфазного напряжения при передаче мощности от источника питания к электродвигателю. При торможении инвертор напряжения работает в режиме рециркуляции и запасенная в электродвигателе энергия передается обратно в источник питания, как показано на рис. 9.66.

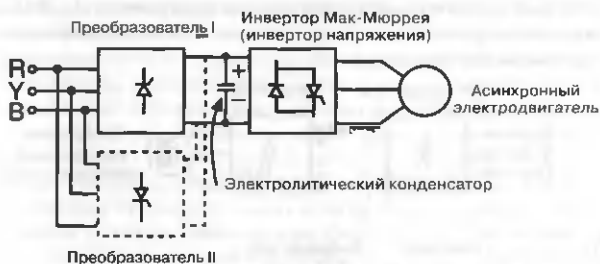


Рис. 9.66. Регенеративное торможение

С одним двухполупериодным выпрямителем в цепи источника питания электродвигателя режим регенерации не возможен, так как на электролитическом конденсаторе, включенным на его выходе, не допускается инверсия полярности напряжения, а тиристоры выпрямителя не могут проводить ток в обратном направлении.

Регенерация возможна при наличии дополнительного антипараллельного двухполупериодного преобразователя в цепи источника питания электродвигателя. В режиме регенерации работа преобразователя I блокируется, а преобразователь, подключенный к электродвигателю, работает в режиме инвертора. В этом режиме электродвигатель работает как индукционный генератор и запасенная механическая энергия преобразуется в электрическую мощность. Преобразователь II преобразует

полученное постоянное напряжение в переменное. Таким образом, мощность возвращается обратно в источник питания. Недостатком этой схемы является необходимость в дополнительном двухполупериодном трехфазном преобразователе.

### Источником питания асинхронного электродвигателя является трехфазный инвертор тока

Блок-схема управления электродвигателем показана на рис. 9.7. Такая схема управления может работать в режиме регенерации. При работе в режиме электродвигателя трехфазное переменное напряжение источника питания преобразуется с помощью трехфазного выпрямителя тока в постоянное напряжение, а затем трехфазным инвертором в регулируемое по частоте напряжение питания электродвигателя. В этом режиме мощность передается от источника питания к электродвигателю и происходит его торможение.

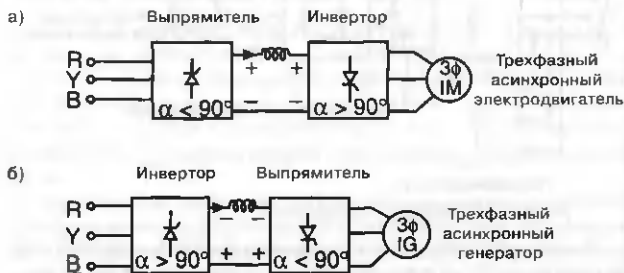


Рис. 9.7. а) Работа в режиме электродвигателя;  
б) Работа в режиме генератора

В режиме регенерации трехфазный инвертор тока работает в режиме управляемого выпрямителя, а выпрямитель работает в режиме инвертора. В этом режиме обмотка ротора подключена к внешнему источнику питания, электродвигатель работает в режиме асинхронного генератора. В этом режиме мощность передается от электродвигателя обратно в источник питания. Такой режим работы электродвигателя называется режимом регенерации.

## 9.4. Система с обратной связью для управления асинхронным электродвигателем

Блок-схема системы управления асинхронным электродвигателем с обратной связью показана на рис. 9.8. В этой схеме скорость вращения электродвигателя поддерживается постоянной для различных постоянных механических нагрузок. Недостатком системы управления с обратной связью является кратковременное изменение скорости вращения электродвигателя при изменении механической нагрузки. Такая система управления содержит две петли замкнутой обратной связи, а именно петлю обратной связи по скорости вращения ротора и петлю обратной связи по току потребления электродвигателя. Петля обратной связи по скорости вращения стабилизирует ее заданное значение. Петля обратной связи по току потребления электродвигателя поддерживает эффективное значение тока потребления на уровне несколько меньшем, чем паспортные значения рабочих токов тиристоров. Обратная связь по току защищает тиристоры от избыточного тока. Напряжение, пропорциональное скорости вращения ротора, можно получить с помощью тахогенератора. Сигналом ошибки петли обратной связи по скорости вращения является разница между установленным сигналом управления номинальной скорости вращения и сигналом фактической скорости вращения на выходе тахогенератора. Сигнал ошибки петли обратной связи по скорости вращения обрабатывается пропорционально-интегрирующим (ПИ<sub>1</sub>) контроллером. Выходной сигнал ПИ-контроллера является заданным значением тока  $I^*$  электродвигателя, соответствующим нулевому сигналу ошибки петли обратной связи по скорости вращения. Реальное значение тока питания электродвигателя можно получить с помощью коммутатора переменного тока со схемой управления. Сигнал ошибки петли обратной связи по току  $I - I^*$  обрабатывается пропорционально-интегрирующим (ПИ<sub>2</sub>) контроллером, выходной сигнал которого подается на схему управления коммутатором переменного тока. При увеличении механической нагрузки скорость вращения ротора уменьшается. Коэффициент скольжения увеличивается, сигнал ошибки петли обратной связи по скорости вращения увеличивается, и сигнал ошибки петли обратной связи по току также увеличивается. Схема управления уменьшает угол включения тиристоров коммутатора.

напряжение питания увеличивается, и скорость вращения асинхронного электродвигателя возвращается к прежнему значению. Таким образом, система управления асинхронным электродвигателем с обратной связью стабилизирует установившуюся скорость вращения.

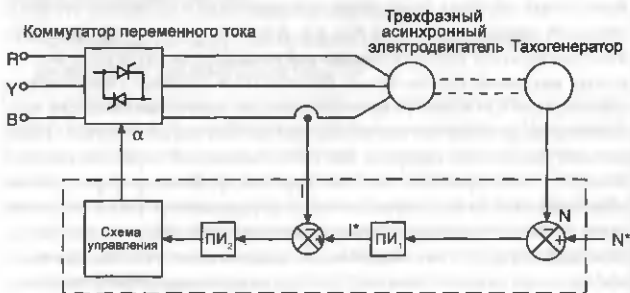


Рис. 9.8. Блок-схема управления асинхронным электродвигателем с обратной связью

## 9.5. Регулирование скорости вращения электродвигателей постоянного тока

На практике применяются два способа регулирования частоты вращения электродвигателей постоянного тока:

- 1) регулирование изменением напряжения якоря;
- 2) регулирование изменением напряжения обмотки возбуждения.

При изменении напряжения якоря напряжение обмотки возбуждения остается постоянным. При регулировании напряжения обмотки возбуждения напряжение на якоре остается постоянным. Зависимости скорости вращения и крутящего момента от изменения напряжения якоря и напряжения обмотки возбуждения изображены на рис. 9.9а. Малые скорости вращения электродвигателя можно получить путем изменения напряжения якоря, а высокие скорости вращения — путем изменения напряжения обмотки возбуждения. При регулировании напряжением якоря механическая энергия увеличивается линейно с увеличением скорости вращения  $P_m = T\omega$ .

Скорость вращения выше номинальной можно получить, уменьшив напряжение на обмотке возбуждения. Крутящий момент при этом



уменьшается, так как уменьшается магнитный поток в статоре. Механическая энергия остается постоянной, поскольку скорость вращения увеличивается обратно пропорционально уменьшению крутящего момента. Регулирование изменением напряжения якоря предпочтительней регулированию изменением напряжения обмотки возбуждения, так как индуктивность якоря намного меньше индуктивности обмотки возбуждения. Иными словами, время реакции на изменение напряжения якоря намного меньше времени реакции на изменение напряжения обмотки возбуждения.

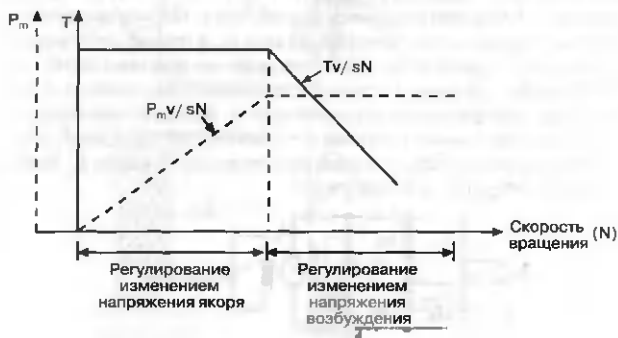


Рис. 9.9а. Характеристики

### 9.5.1. Одноквадрантный драйвер электродвигателя постоянного тока

Полярность выходного напряжения в схеме на рис. 9.9б, невозможно реверсировать из-за наличия в цепи питания мостового выпрямителя. Поэтому такое устройство называется одноквадрантным драйвером электродвигателя постоянного тока. Схема управляемого мостового выпрямителя для питания электродвигателя постоянного тока с отдельным источником питания для обмотки возбуждения изображена на рис. 9.9б. В этой схеме используется трансформатор с двумя вторичными обмотками. Переменное напряжение с одной обмотки подается на мостовой управляемый выпрямитель, а переменное напряжение другой обмотки — на нерегулируемый выпрямитель. Регулируемое постоянное

напряжение от мостового управляемого выпрямителя поступает на якорь. Выходное напряжение выпрямителя регулируется путем изменения угла включения тиристоров. Таким образом, скорость вращения электродвигателя постоянного тока может изменяться при изменении угла включения тиристоров. Скорость вращения уменьшается с увеличением угла  $\alpha$ , и наоборот.

В момент времени  $\alpha$  тиристор  $T_1$  включается. Тиристор  $T_1$  и диод  $D_2$  находятся в проводящем состоянии в диапазоне углов от  $\alpha$  до  $\pi$ .  $V_a$  и  $I_a$  положительные. Мощность передается от источника питания электродвигателю. Когда угол становится больше, чем  $\pi$ , ток электродвигателя начинает протекать через демпферный диод  $D_F$ . В течение этого периода напряжение  $V_a$  равно нулю. Ток в обмотке якоря протекает до тех пор, пока демпферный диод  $D_F$  остается в проводящем состоянии, и за счет этого тока поддерживается крутящий момент. В течение отрицательного полупериода в момент времени  $\pi + \alpha$  включается тиристор  $T_2$ , и ток электродвигателя теперь протекает через тиристор  $T_2$  и диод  $D_1$ . Вышеупомянутый процесс повторяется.

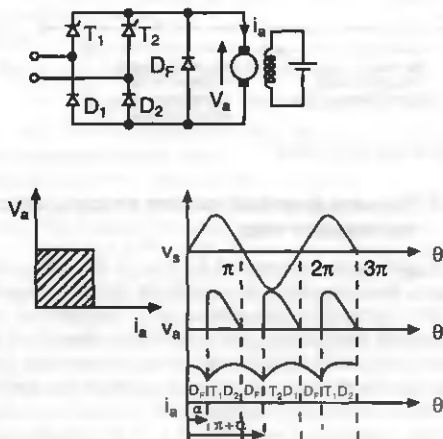


Рис. 9.96. Управляемый выпрямитель для питания электродвигателя постоянного тока

### 9.5.2. Двухквadrантный драйвер электродвигателя постоянного тока

Однофазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель для питания электродвигателя постоянного тока показан на рис. 9.10. Среднее выходное напряжение  $V_a$  этого выпрямителя положительное при значениях углов  $\alpha$  от 0 до  $90^\circ$ . Напряжение  $V_a$  отрицательное при значениях углов  $\alpha$  от  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

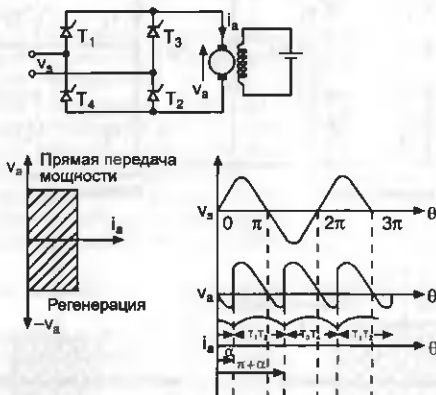


Рис. 9.10. Однофазный двухполупериодный управляемый мостовой выпрямитель для питания электродвигателя постоянного тока

В такой схеме возможен двухквadrантный режим работы. Первый квадрант соответствует режиму прямой передачи мощности, а четвертый квадрант соответствуют режиму ретенерации. В процессе регенерации механическая энергия, запасенная в электродвигателе, поддерживает механизм протекания постоянного тока в цепи якоря. Напряжение на якоре в этом режиме может быть больше, чем напряжение питания. Электродвигатель в этом случае работает в режиме генератора, а однофазный двухполупериодный упраляемый мостовой выпрямитель работает в режиме линейно коммутируемого инвертора. Мощность постоянного тока преобразуется в мощность переменного тока и передается обратно в источник питания.

### 9.5.3. Четырехквadrантный драйвер электродвигателя постоянного тока

Схема питания электродвигателя постоянного тока с двумя управляемыми мостовыми выпрямителями изображена на рис. 9.11. Такое устройство называется двойным выпрямителем.

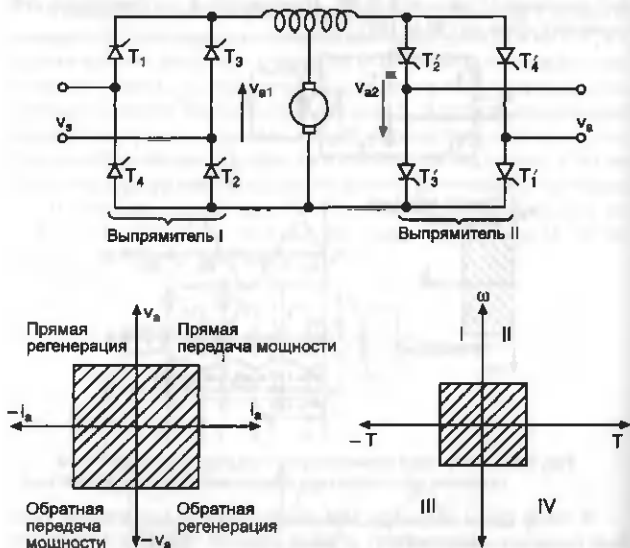


Рис. 9.11. Схема питания электродвигателя постоянного тока с двумя управляемыми мостовыми выпрямителями

С помощью выпрямителя I возможна работа в первом и четвертом квадрантах, а с помощью выпрямителя II — во втором и третьем квадрантах, поскольку ток через нагрузку при этом течет в противоположном направлении.

Возможны два режима работы этой схемы:

- 1) синхронная работа, или режим циркулирующего тока;

2) асинхронная работа, или режим работы без циркулирующего тока.

В режиме синхронной работы выпрямители работают таким образом, чтобы углы включения тиристоров в первом и втором выпрямителях удовлетворяли условию  $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ . Через замкнутую цепь, образованную двумя выпрямителями, протекает циркулирующий ток до тех пор, пока величины выходных напряжений двух выпрямителей не будут равны. Величина циркулирующего тока ограничена индуктивностью.

В асинхронном режиме работы в каждый момент времени запускаются тиристоры только одного выпрямителя. Запуск тиристоров другого выпрямителя блокируется.

Переход во включенное состояние с одного на другой выпрямитель требует большого времени, поскольку нагрузка в схеме индуктивно-резистивная. Следовательно, скорость управления в этом режиме меньше по сравнению с синхронным режимом.

Четырехквadrантный драйвер электродвигателя постоянного тока позволяет реализовать следующие режимы работы:

$T$  (положительный),  $\omega$  (положительная) — прямая передача мощности;

$T$  (отрицательный),  $\omega$  (отрицательная) — обратная передача мощности;

$T$  (отрицательный),  $\omega$  (положительная) — прямая регенерация;

$T$  (положительный),  $\omega$  (отрицательная) — обратная регенерация.

Мощность электродвигателя равна произведению крутящего момента на скорость вращения —  $P_m = T\omega$ .

## 9.6. Торможение электродвигателя постоянного тока

### 9.6.1. Торможение противовключением

Направление крутящего момента электродвигателя постоянного тока можно изменить, изменив направление тока в якоре или обмотке статора. Когда изменяется направление магнитного поля, изменяется и полярность индуцированного напряжения в якоре. Для ограничения тока при изменении его направления во внешнюю цепь необходимо включение дополнительного резистора, как показано на рис. 9.12а. Недостатками такого способа торможения являются большие механические нагрузки на ротор и большие потери мощности.

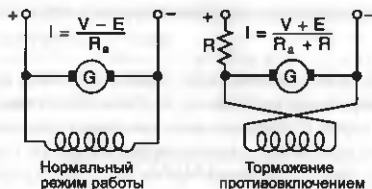
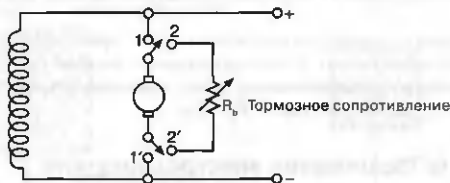


Рис. 9.12а

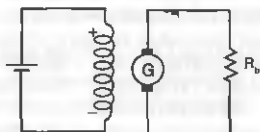
### 9.6.2. Динамическое торможение

Напряжение питания якоря отключается, в то время как напряжение питания обмоток статора остается подключенным. Якорь продолжает вращаться за счет запасенной кинетической энергии. Электродвигатель постоянного тока работает в режиме генератора, поскольку обмотки статора создают магнитное поле. Механическая энергия преобразуется в электрическую энергию и рассеивается на тормозном сопротивлении. Величина тормозного крутящего момента может регулироваться изменением сопротивления  $R_b$ , как показано на рис. 9.12б.



Положение 1-1' – Нормальный режим работы

Положение 2-2' – Торможение



Эквивалентная схема для положения 2-2'

Рис. 9.12б

### 9.6.3. Регенеративное торможение

Схема регенеративного торможения электродвигателя постоянного тока приведена на рис. 9.12в. При нормальной работе электродвигателя двухполупериодный преобразователь работает как выпрямитель. Когда ключи  $C_1$  и  $C_2$  находятся в замкнутом состоянии, а ключи  $C_3$  и  $C_4$  — в разомкнутом, электродвигатель работает в нормальном режиме. В режиме торможения двухполупериодный преобразователь работает как инвертор, ключи  $C_3$  и  $C_4$  находятся в замкнутом состоянии, а ключи  $C_1$  и  $C_2$  в разомкнутом. Запасенная мощность передается обратно в источник питания, и происходит торможение электродвигателя.



Рис. 9.12в. Регенеративное торможение

## 9.7. Система с обратной связью для управления электродвигателем постоянного тока

Блок-схема системы управления с обратной связью электродвигателем постоянного тока показана на рис. 9.13. Такая система управления содержит две петли замкнутой обратной связи, а именно петлю обратной связи по скорости вращения ротора и петлю обратной связи по току потребления электродвигателя. Петля обратной связи по скорости вращения стабилизирует ее заданное значение. Петля обратной связи по току потребления электродвигателя поддерживает эффективное значение тока потребления на уровне несколько меньшем, чем паспортные значения рабочих токов тиристоров. Обратная связь по току защищает тиристоры от избыточного тока. Система управления с обратной связью для управления электродвигателем постоянного тока обеспечивает

постоянство скорости вращения электродвигателя при изменении напряжения питания и величины нагрузки.

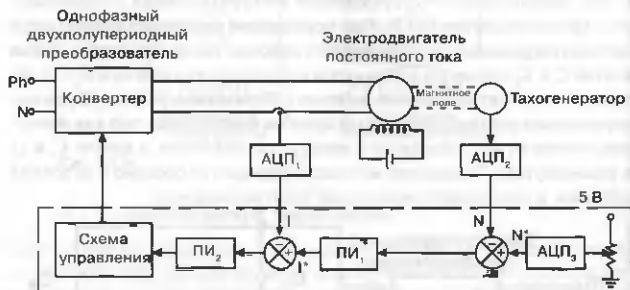


Рис. 9.13. Блок-схема управления электродвигателем постоянного тока с обратной связью

Текущую скорость вращения можно измерить с помощью кодового датчика положения вала или тахогенератора. Выходное значение кодового датчика положения вала представляется в цифровом виде. При использовании аналогового тахогенератора необходим аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) для преобразования аналогового сигнала тахогенератора в цифровой код. Выходное значение кода счетчика является текущей скоростью вращения электродвигателя. Сигнал ошибки петли обратной связи по скорости вращения обрабатывается пропорционально-интегрирующим ( $\text{ПИ}_1$ ) контроллером. Ток потребления электродвигателем может считываться с использованием шунта или трансформатора постоянного тока. Далее аналоговый сигнал, пропорциональный эффективному значению тока, преобразуется в цифровой сигнал и обрабатывается пропорционально-интегрирующим ( $\text{ПИ}_2$ ) контроллером. При увеличении механической нагрузки на электродвигатель его частота вращения уменьшается. Контроллеры  $\text{ПИ}_1$  и  $\text{ПИ}_2$ , а также схема управления работают таким образом, что угол управления тиристорами уменьшается, а рабочий цикл коммутатора увеличивается. Таким образом, система управления асинхронным электродвигателем с обратной связью стабилизирует установленную скорость вращения.



## 9.8. Регулируемый источник питания

Регулируемые источники постоянного напряжения применяются в лабораториях, в медицинской аппаратуре, для питания электронных схем и т. д. Они могут быть двух типов: 1) линейные источники питания и 2) импульсные источники питания.

Схема линейного регулируемого источника питания изображена на рис. 9.14. Сетевое переменное напряжение уменьшено до необходимой величины с помощью понижающего трансформатора. Выпрямитель преобразует переменное напряжение в однополярное пульсирующее напряжение. Это напряжение фильтруется с помощью П-образного фильтра. Отфильтрованное нестабилизированное постоянное напряжение преобразуется с помощью диода Зенера в регулируемое стабилизированное постоянное напряжение.

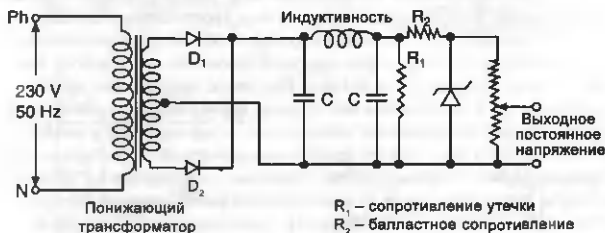


Рис. 9.14. Регулируемый источник питания

С помощью потенциометра величину стабилизированного постоянного напряжения можно регулировать от нуля до максимального значения. Сопротивление утечки подключено параллельно к конденсаторам фильтра. Через него разряжаются конденсаторы фильтра, когда источник переменного напряжения выключен и на выходе источника питания нагрузка отсутствует. Такой источник питания имеет большие габариты из-за большого размера трансформатора элементов фильтра.

## 9.9. Импульсный источник питания

Недостатками линейного источника питания являются его большие габариты и вес.

Размеры трансформатора и элементов фильтра в импульсном источнике питания существенно меньше. Схема импульсного источника питания приведена на рис. 9.15.

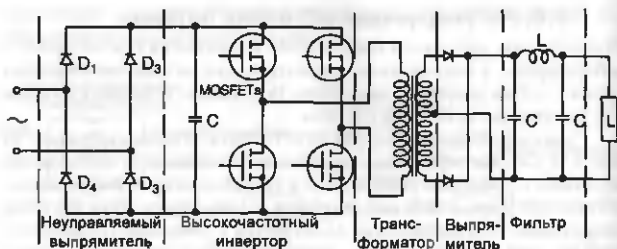


Рис. 9.15. Импульсный источник питания

Входное переменное напряжение величиной 220 В непосредственно подается на диодный выпрямитель. Постоянное выходное напряжение выпрямителя является входным постоянным напряжением высокочастотного инвертора, который работает при частоте переключения приблизительно 200 кГц. Выходное напряжение инвертора преобразуется к необходимому уровню понижающим трансформатором. Это высокочастотное напряжение выпрямляется с помощью неуправляемого двухполупериодного выпрямителя. Выходное напряжение выпрямителя фильтруется с помощью П-образного LC-фильтра. Размеры элементов фильтра существенно уменьшаются, поскольку рабочая частота высокая. Мощность трансформатора зависит от величины магнитного потока и рабочей частоты. Если рабочая частота трансформатора увеличивается, то необходимый магнитный поток становится меньше, следовательно, размер сердечника уменьшается. Трансформатор также обеспечивает гальваническую развязку между входной и выходной цепями.

### 9.10. Электросварка

Технология сплавления двух металлических элементов с помощью большого тока  $I$ , пропускаемого через участок цепи с сопротивлением  $R$ , где требуется высокая температура, называется электросваркой. Тепловая энергия  $W$ , требуемая для электросварки, рассчитывается по формуле:

$$W = F R t,$$

где  $t$  — время, требуемое для проведения электросварки. Мощность, необходимую для электросварки, можно регулировать с помощью

коммутатора переменного тока. Количество коммутированных полных периодов переменного тока задается с помощью схемы управления. Величину сварочного тока можно увеличить с помощью понижающего трансформатора  $TR_1$ . Электрическая схема сварочного аппарата с коммутатором переменного тока и формы сигналов показаны на рис. 9.16а.

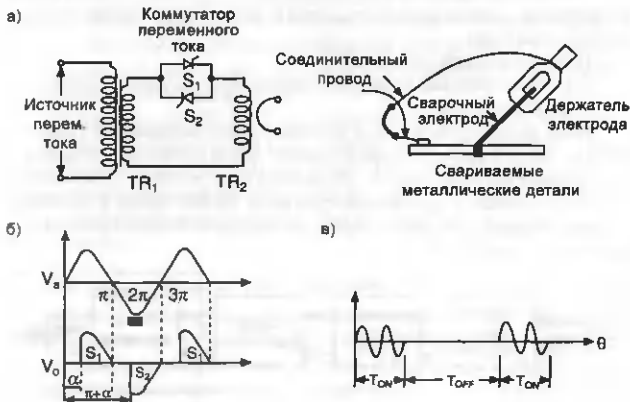


Рис. 9.16. Сварка:

а) Контактная электросварка;

б) Фазовое управление;

в) Управление путем коммутации целого числа периодов переменного тока

В регулируемом коммутаторе угол включенного состояния тиристоров определяет временной интервал  $t$  прохождения тока. Недостатком фазового управления является низкий коэффициент мощности, наличие высоких гармонических составляющих и больших электромагнитных помех.

Регулирование средней величины тока путем коммутации целого числа периодов переменного тока также позволяет регулировать мощность электросварки. При этом способе регулирования тока сварки существенно уменьшаются электромагнитные помехи, и улучшается коэффициент мощности. Нагрузка сварочного аппарата подключается ко вторичной обмотке трансформатора  $TR_2$ .

Форма напряжения в цепи сварки в случае фазового управления показана на рис. 9.16б, а при коммутации целого числа периодов переменного тока — на рис. 9.16в.

## 9.11. Нагревание

### Резистивный нагрев

Резистивный нагрев можно осуществить путем пропускания электрического тока через:

- 1) металлический проводник;
- 2) неметаллический проводник, например углеродный стержень;
- 3) жидкость и т. д.

Резистивные нагреватели в основном изготавливаются из сплавов никеля, хрома и урана. Они представляют собой провод или тонкую полосу, намотанную на катушку. Резистивные нагреватели используются в электроплитках и высокотемпературных лабораторных и промышленных керамических печах. Схема питания резистивного нагревателя приведена на рис. 9.17а.

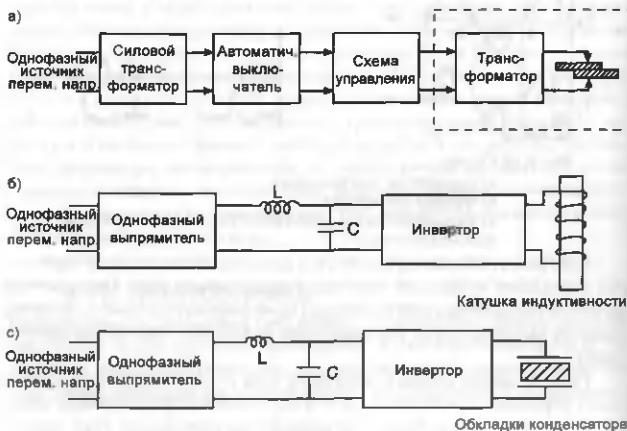


Рис. 9.17. а) Резистивный нагрев;  
б) Высокочастотный индукционный нагрев;  
в) Диэлектрический нагрев

### Индукционный нагрев

Индукционный нагрев также известен как нагревание вихревыми токами. В этом случае тепловая энергия выделяется вследствие потерь за счет протекания вихревых токов в нагреваемом объекте. Такой способ нагревания используется при плавлении, отжиге, ковке, поверхностной закалке и при пайке. Индукционный нагрев производится наведенным током в проводящем объекте, помещенном в переменное электромагнитное поле. Переменное электромагнитное поле получают с помощью катушки индуктивности, подключенной к источнику высокочастотного напряжения, как показано на рис. 9.17б.

Металлический предмет, помещенный в эту катушку индуктивности, будет нагреваться за счет наведенных в нем вихревых токов переменным электромагнитным полем. Поскольку потери вихревых токов при увеличении частоты электромагнитного поля увеличиваются, количество выделяемого тепла в нагреваемом объекте также увеличивается.

### Высокочастотный нагрев в электрическом поле

Блок-схема устройства высокочастотного нагрева в электрическом поле изображена на рис. 9.17в. Переменное напряжение однофазного источника питания выпрямляется однофазным выпрямителем и фильтруется LC-фильтром для устранения пульсаций выпрямленного напряжения. Полученное постоянное напряжение преобразуется инвертором в высокочастотное напряжение, которое подается на обкладки конденсатора.

Между обкладками конденсатора помещается диэлектрический (непроводящий) нагреваемый объект. Выделение тепла в диэлектрическом материале происходит из-за потерь при протекании в нем емкостного тока. Таким образом, непроводящий материал выполняет задачу нагревателя. Частота выходного напряжения инвертора зависит от характеристик диэлектрического материала и требуемой температуры нагрева.

Этот способ нагрева широко используется при производстве пластических материалов и в лесной промышленности. Он особенно эффективен при сушке древесины и склеивании фанеры. Высокочастотный нагрев также используется в текстильной, каучуковой, химической и пищевой промышленности.

### 9.12. Регулятор напряжения с гальванической развязкой от нагрузки

Энергосистема автобусов должна поддерживать постоянное напряжение на нагрузке, которая непосредственно подсоединена к источнику питания. Изменения напряжения на нагрузке вызываются колебаниями мощности потребления самой нагрузки и конечным импедансом линии передачи между источником питания и нагрузкой. Регулирование напряжения в этом случае осуществляется трансформатором с переменным коэффициентом трансформации, включенным между источником питания и нагрузкой. Первичная высоковольтная обмотка такого трансформатора обычно имеет большое количество дополнительных отводов. Коэффициент трансформации и, следовательно, выходное напряжение в этом случае можно регулировать с помощью механического переключателя. В большинстве случаев такие переключения выполняются достаточно редко и при отсутствии нагрузки. В режиме нагрузки или в случае, когда нагрузку отключать недопустимо, переключение отводов трансформатора происходит с искрообразованием на контактах механического переключателя. Этот процесс влечет за собой эрозию контактов и загрязнение масляного наподпителя. Другими недостатками такого регулирования являются его высокая стоимость, трудоемкое обслуживание и низкая эффективность.

На рис. 9.18а приведена базовая электрическая схема управляемого тиристором регулятора напряжения, гальванически развязанного от нагрузки. Эта схема состоит из трансформатора  $T_1$  с третьей обмоткой, подсоединенной к дополнительному трансформатору  $T_2$  через встречно включенные тиристоры  $S_1$ . При включении тиристорного ключа  $S_1$  в момент времени, когда входное напряжение равно нулю, к напряжению на вторичной обмотке трансформатора  $T_1$  добавляется напряжение дополнительного трансформатора  $T_2$ .

Встречно включенные тиристорные ключи  $S_2$  необходимы для исключения разомкнутого состояния первичной обмотки трансформатора  $T_2$  при запаздывании включения ключа  $S_1$ .

Ток в первичной обмотке трансформатора  $T_2$  определяется током нагрузки, но не током вторичной обмотки, как в обычном трансформаторе.

Если первичная обмотка дополнительного вольтодобавочного трансформатора находится в разомкнутом состоянии, то на его вторичной обмотке появляется очень высокое напряжение и происходит насыщение сердечника большим магнитным потоком. При включении

ключа  $S_2$  магнитный поток первичной обмотки дополнительного трансформатора  $T_2$  компенсирует магнитный поток его вторичной обмотки и насыщения сердечника не происходит.

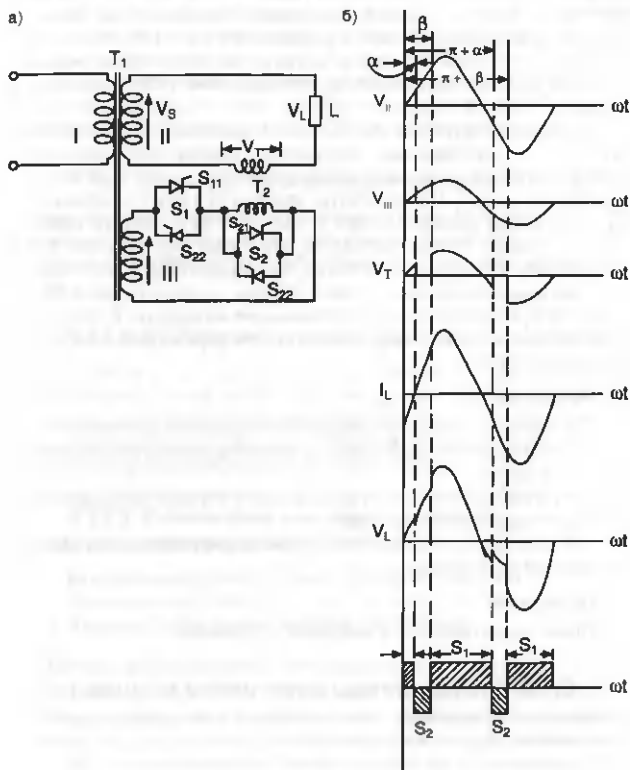


Рис. 9.18. а) Регулятор, управляемый тиристором, гальванически развязанный от нагрузки;

б) Формы сигналов

Формы напряжений и токов с учетом запаздывания запуска ключей показаны на рис. 9.18б. Углы включения  $\alpha$  и  $\beta$  соответствуют времени задержки включения ключей  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. Прямо смещенный тиристор  $S_{11}$  ключа  $S_1$  может быть включен в любой момент времени, когда значение угла  $\alpha$  находится в диапазоне  $\theta < \alpha < 180^\circ$ , где  $\theta$  — разность между фазовым углом напряжения и тока. Точно так же тиристор  $S_{21}$  ключа  $S_2$  может быть включен, когда значение угла  $\beta$  находится в диапазоне  $0 < \beta < \theta$ .

Напряжение на третьей обмотке трансформатора  $T_1$  синусоидальное. Это напряжение не поступает на первичную обмотку дополнительного трансформатора  $T_2$  на промежутке времени от 0 до  $\alpha$ , то есть до момента включения ключа  $S_1$ . На промежутке времени от  $\beta$  до  $\pi + \alpha$  напряжение третьей обмотки трансформатора  $T_1$  поступает на первичную обмотку дополнительного трансформатора  $T_2$  через включенный ключ  $S_1$  и к напряжению  $V_3$  вторичной обмотки трансформатора  $T_1$  добавляется дополнительное напряжение. Таким образом, дополнительный трансформатор  $T_2$  увеличивает среднее напряжение на нагрузке  $V_L$ . Величину этого напряжения можно регулировать путем управления углом включения тириستоров.

### Преимущества

1. Возможно плавное регулирование напряжения на нагрузке.
2. Такой регулятор может быть применен в системе регулирования с обратной связью.
3. В регуляторе отсутствует механический переключатель дополнительных отводов трансформатора.
4. В процессе регулирования отсутствуют кратковременные падения напряжения на нагрузке.

### Недостаток

Присутствие гармоник в выходном напряжении.

## 9.13. Компенсаторы реактивной мощности

В данном случае тиристоры используются для коммутации конденсаторов или индуктивностей в цепях питания в целях компенсации реактивной мощности нагрузки. С помощью тириستоров возможно осуществить очень быстрое и непрерывное регулирование реактивной мощности.

Компенсаторы реактивной мощности представляют собой внешние дополнительные устройства к источникам питания, предназначенные



для компенсации реактивной мощности нагрузки, за счет чего существенно снижается мощность потребления от источника переменного напряжения. Функция статических компенсаторов состоит в минимизации флуктуаций напряжения в сети при заданной нагрузке и улучшении коэффициента мощности источника за счет компенсирования реактивной компоненты нагрузки.

Задача компенсации реактивной мощности может быть решена путем компенсации реактивности нагрузки или компенсации реактивности линии передачи.

### **9.13.1. Компенсация реактивной компоненты нагрузки**

Цель компенсации реактивной компоненты нагрузки состоит в том чтобы уменьшить или нейтрализовать реактивный расход энергии больших и средних потребителей таких как плавильные печи, прокатные станы и т. п.

### **9.13.2. Стабилизация напряжения в линиях передачи**

Задача состоит в том чтобы сбалансировать напряжения трех фаз на определенном участке линии передачи, и в регулировке напряжения всякий раз, когда оно отклоняется от заданного значения. Величина передаваемого напряжения регулируется путем шунтирования реактивной составляющей линии дополнительной реактивностью.

### **9.13.3. Компенсация реактивной мощности шунтированием**

1. Батареи конденсаторов с фиксированной емкостью.
2. Конденсаторы, коммутируемые тиристорами.
3. Индуктивности, коммутируемые тиристорами.

#### **Батареи конденсаторов с фиксированной емкостью**

Опережающий по фазе ток, протекающий через шунтирующий конденсатор, компенсирует запаздывание тока в нагрузке. Такие батареи конденсаторов устанавливаются на клеммах питания устройства перед запуском его в эксплуатацию. В случае широкого колебания нагрузки оптимальная компенсация не достигается. Батарея конденсаторов с фиксированной емкостью компенсирует или недостаточно, или избыточно.

Выключение конденсатора происходит после блокирования запускающих импульсов встречно включенных тиристоров. Таким образом, тиристоры выключаются, как только ток через них уменьшается до нулевого значения. Очевидно, что конденсатор тогда останется заряженным до минимального либо максимального значения напряжения сети и будет подготовлен к новому включению в мягком режиме. Такой режим коммутации называется режимом подавления переходных процессов по цепи управления.

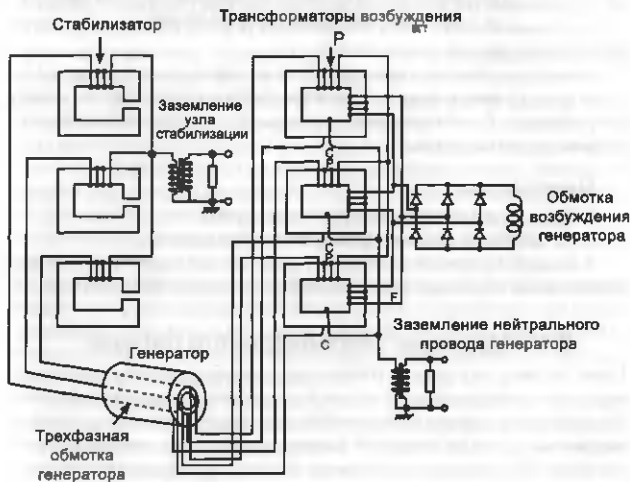
Базовая схема индуктивного однофазного компенсатора реактивной мощности, коммутируемого тиристорами, изображена на рис. 9.196. Двухнаправленный тиристорный коммутатор включен последовательно с индуктивностью. Тиристорный ключ коммутатора состоит из двух встречно включенных тиристоров. В зависимости от рабочего напряжения ключа используется последовательное соединение нескольких относительно низковольтных тиристоров в каждом плече. Изменяя угол включения тиристоров, можно непрерывно менять величину тока от нуля до максимального значения, как показано на рис. 9.196. На практике используется повышающий трансформатор, для того чтобы привести в соответствие рабочий ток индуктивного компенсатора реактивной мощности и допустимый ток тиристоров.

При увеличении задержки угла включения тиристорного ключа индуктивная компонента тока компенсатора уменьшается, что эквивалентно увеличению индуктивности реактивной компоненты нагрузки. При этом реактивная мощность индуктивной компоненты уменьшается пропорционально уменьшению величины тока компенсатора. Схема, в которой индуктивность коммутируется тиристорами, обладает свойством управляемой реактивной проводимости, и может быть использована как компенсатор реактивной мощности. Ток в этой схеме минимальный при  $\alpha = 180^\circ$  и максимальный при  $\alpha = 90^\circ$ . Таким образом, при изменении фазы включения тиристоров  $\alpha$  от  $180^\circ$  до  $90^\circ$  индуктивная компонента компенсатора может непрерывно регулироваться от минимального значения до максимального.

На практике для регулирования коэффициента мощности используется комбинация компенсаторов с коммутируемыми тиристорами конденсаторами и с коммутируемыми тиристорами индуктивностями. Такая комбинация позволяет плавно управлять реактивной мощностью в широких пределах.

## 9.14. Система возбуждения генераторов переменного тока

Система возбуждения генератора переменного тока (рис. 9.20) является замкнутой системой, в которой источником питания является сам генератор переменного тока. Энергия возбуждения генератора обеспечивается магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым протекающим в обмотках генератора током. Обмотки возбуждения генератора подключены к трехфазному источнику напряжения с регулируемым выходным током. Когда генератор работает без нагрузки, мощность, расходуемая на питание обмоток возбуждения, незначительна. Если к генератору подключена нагрузка, ток питания обмоток возбуждения увеличивается. Такая система является саморегулирующейся и обладает очень хорошими характеристиками.



- Р — обмотки возбуждения  
 С — управляющие обмотки  
 F — выходные обмотки трансформаторов возбуждения

Рис. 9.20. Система возбуждения генератора переменного тока

Система возбуждения генератора состоит из трех трансформаторов возбуждения, обеспечивающих регулируемый выходной ток, сила которого зависит от напряжения на нагрузке, протекающего через нагрузку тока и коэффициента мощности.

Источник питания системы возбуждения состоит из трехфазной обмотки генератора, охлаждаемой водой, которая соединена с обмотками возбуждения трех однофазных трансформаторов возбуждения и с тремя линейными стабилизаторами. Обмотка возбуждения генератора размещается на магнитном сердечнике статора. Источник управляющего тока образован тремя нейтральными выводами обмоток статора, которые пропускаются через сердечники трансформаторов возбуждения. Они называются управляющими обмотками и являются входными обмотками трансформаторов возбуждения. Эти обмотки обеспечивают дополнительный ток в обмотках возбуждения при увеличении нагрузки. Управляющая обмотка также обеспечивает условия начального возбуждения генератора при его запуске.

Выходные обмотки трансформаторов возбуждения соединены по схеме треугольника и подключены к трехфазному диодному мостовому выпрямителю. Выпрямленный постоянный ток подается на обмотку возбуждения генератора.

### Преимущества

1. Быстрая реакция при изменении нагрузки.
2. Не требуется дополнительная схема управления.
3. Диодный выпрямитель имеет лучшие рабочие характеристики, чем тиристорный, поскольку прямое падение напряжение на диодах меньше.

## 9.15. Источник бесперебойного питания

Такие системы, как компьютерные, медицинские, системы управления воздушным транспортом, требуют бесперебойного энергоснабжения. Простейшие источники бесперебойного электропитания состоят из выпрямителя, аккумуляторной батареи и инвертора, как показано на рис. 9.21а. Выпрямитель преобразует входное переменное напряжение в постоянное, которое подается на инвертор. Инвертор обеспечивает постоянную величину и частоту напряжения на нагрузке.

Аккумуляторная батарея является буферным источником питания. При пропадании сетевого напряжения аккумуляторная батарея обеспечивает питание инвертора. Преимуществами этой системы являются ее

простота применения и низкая стоимость. Однако при неисправности инвертора, аккумуляторной батареи или выпрямителя работоспособность системы будет нарушена. Следовательно, такая система не является в действительности системой бесперебойного питания.

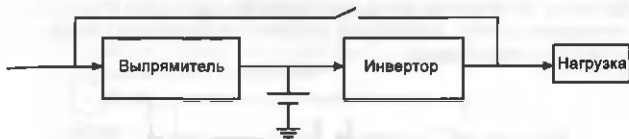


Рис. 9.21а. Источник бесперебойного питания без резервирования

### 9.15.1. Источник бесперебойного питания с системой параллельного резервирования

Блок-схема системы параллельного резервирования показана на рис. 9.21б. Надежность источника бесперебойного питания можно увеличить путем включения дополнительного количества параллельных резервных модулей. Среднее время наработки на отказ такой системы составляет сотни тысяч часов. Система параллельного резервирования состоит из двух параллельно включенных выпрямителей, каждый из которых выдерживает предельную нагрузку, аккумуляторной батареи и четырех параллельно включенных инверторов, каждый из которых также способен выдерживать предельную нагрузку при двух выключенных инверторах.

В случае неисправности одного из инверторов ее надо устранить немедленно. Неисправный инвертор должен быть отключен, так как его неисправность может вызвать кратковременное падение напряжения на шине питания. Отключение неисправного инвертора обеспечивается с помощью полупроводникового ключа.

Помимо обеспечения непрерывности питания, источник бесперебойного питания должен также минимизировать изменения напряжения в переходном режиме на шине питания. Инверторы должны обеспечить устойчивое напряжение на шине питания при любых изменениях нагрузки в заданных пределах. Для улучшения переходной характеристики инвертора он должен иметь низкое внутреннее сопротивление.

Величина нагрузки и требуемое время работы в аварийном режиме определяют параметры аккумуляторной батареи. Можно уменьшить размеры и стоимость аккумуляторной батареи, если ее время работы до

включения дизельного генератора минимизировать. Дизельный генератор используется в качестве источника питания в стационарных системах бесперебойного питания. Такая система гарантирует бесперебойное энергоснабжение даже в течение длительного отключения сетевого напряжения. В системе также предусмотрена автоматически управляемая обходная цепь, для того чтобы обеспечить бесперебойность питания без внешнего вмешательства.

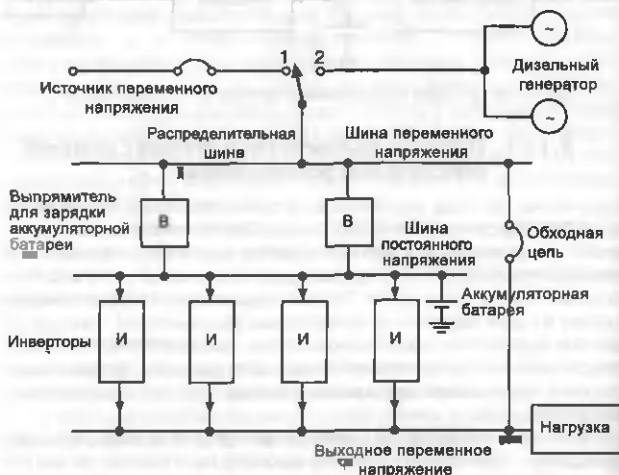


Рис. 9.216. Источник бесперебойного питания с резервированием

Схема управления обеспечивает фазированную работу всех инверторов за счет использования общего управляющего сигнала. Следовательно, любой инвертор может быть включен или выключен в работающей системе.

Шина постоянного напряжения обеспечивает изоляцию нагрузки от импульсных помех на входе источника бесперебойного питания. Аккумуляторная батарея может обеспечить питание инверторов около одного часа при предельной нагрузке. Дизельные генераторы запускаются автоматически при пропадании напряжения в сети. После включения обходной цепи питания нагрузки происходит от дизельного генератора.

### 9.16. Линия электропередачи высокого напряжения на постоянном токе

Конструктивные особенности современных генераторов постоянного тока не позволяют напрямую получать высокие напряжения. Трансформатор для повышения постоянного напряжения использовать невозможно. Высокое постоянное напряжение получают путем выпрямления высокого переменного напряжения,

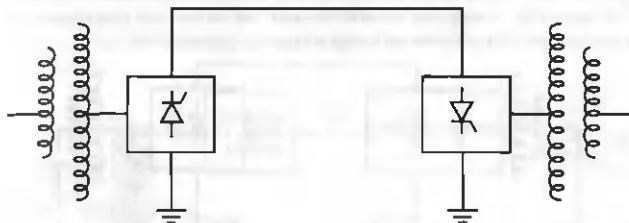


Рис. 9.21в. Однополярная линия электропередачи высокого напряжения на постоянном токе

Полученное высокое постоянное напряжение далее преобразуется обратно в переменное с помощью инвертора. Линии электропередачи высокого напряжения на постоянном токе бывают однополярные и двухполярные. Однополярная линия передачи содержит только один провод, а заземление в ней используется в качестве обратного провода. В двухполярных линиях передачи используются два провода. На передающем конце переменное напряжение повышается с помощью трансформатора. Полученное высокое напряжение с помощью выпрямителя преобразуется в постоянное напряжение, которое передается на большие расстояния. Однополярная схема линии электропередачи высокого напряжения показана на рис. 9.21в, а двухполярная — на рис. 9.2г.

Способ передачи электроэнергии на постоянном токе обладает следующими преимуществами:

1. Простая конструкция линии электропередачи;
2. Потери энергии при передаче меньше, так как индуктивное сопротивление на постоянном токе равно нулю;
3. Емкостное сопротивление линии передачи на постоянном токе бесконечное;
4. Отсутствует скин-эффект;

5. Не требуется компенсация реактивной мощности;
6. Уменьшается уровень радиопомех;
7. Возможно более высокое рабочее напряжение;
8. Нет проблем стабилизации напряжения, так как последовательное реактивное сопротивление линии передачи равно нулю;
9. Величина тока короткого замыкания мала.

Экономичнее передавать мощность при высоком напряжении и малом токе. Недостатками этого метода являются высокая стоимость оборудования и наличие гармонических составляющих при обратном преобразовании постоянного напряжения в переменное.

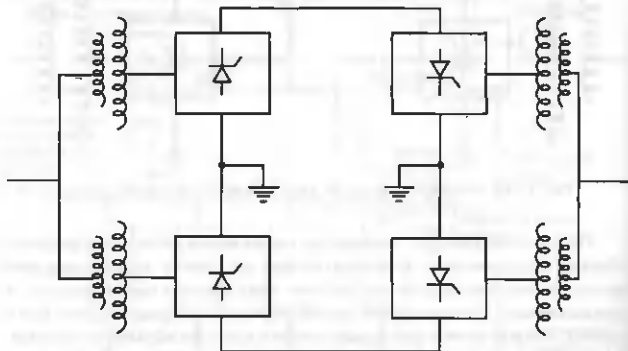


Рис. 9.21г. Двухполярная линия электропередачи высокого напряжения на постоянном токе

## 9.17. Управляемый микропроцессором электропривод

### 9.17.1. Регулирование скорости вращения электродвигателя постоянного тока с помощью микропроцессора

Входное переменное напряжение преобразуется в регулируемое постоянное напряжение с помощью управляемого мостового выпрямителя. Регулируемое постоянное напряжение подается на электродвигатель постоянного тока, как показано на рис. 9.10.



Назначением цепи управления является преобразование угла включения тиристоров в соответствующую задержку между напряжением питания и запускающим импульсом.

Задержка угла включения тиристоров отсчитывается от момента перехода напряжения питания через нулевой уровень, что требует наличия синхронизации работы микропроцессора с источником переменного напряжения. Прерывание работы микропроцессора является эффективным методом синхронизации с источником переменного напряжения. Интерфейс между микропроцессором и источником питания содержит только детектор нулевого уровня и формирователь, как показано на рис. 9.22а.



Рис. 9.22а. Интерфейс

Выходной сигнал детектора нулевого уровня высокий в течение положительного полупериода напряжения питания и низкий в течение отрицательного. Схема формирователя содержит два моностабильных мультивибратора, один из которых срабатывает по переднему фронту выходного напряжения детектора нулевого уровня, а другой — по заднему. Выходные импульсы формирователя подаются на вход установки микропроцессора в начальное состояние. Сигналы интерфейса в разных точках показаны на рис. 9.22б.

Управление временем задержки включения тиристоров обеспечивается программируемым таймером, режимом работы которого управляет микропроцессор.

После установки микропроцессора в начальное состояние выходным сигналом интерфейса микропроцессор считывает с внешнего перепрограммируемого запоминающего устройства (ПЗУ) значение угла задержки включения тиристоров  $\alpha$ . Затем микропроцессор вычисляет

время задержки включения, соответствующее считанному значению  $\alpha$ , и загружает это время в таймер.

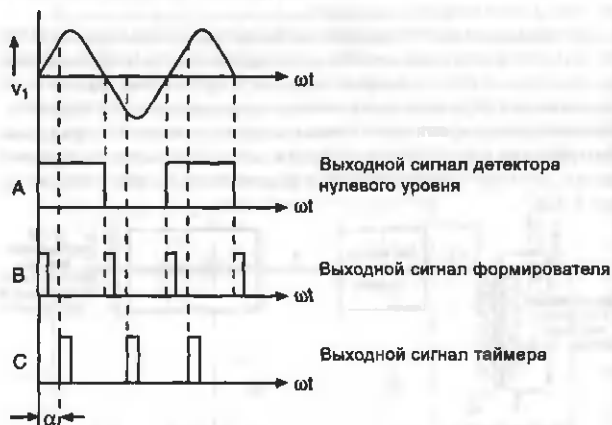


Рис. 9.22б. Управление углом включения тиристора

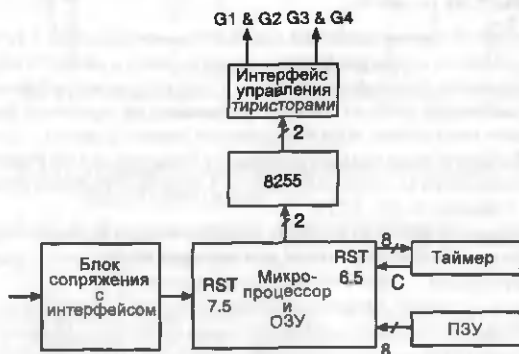


Рис. 9.22в. Аппаратные средства

Таймер программируется на работу в режиме «0» (прерывание при достижении нуля). После программирования режима работы таймера его выходной логический уровень устанавливается в нулевое состояние. Счетчик запускается и начинает отсчет времени. По окончании отсчета выходной логический уровень таймера переходит в единичное состояние. Для получения следующего управляющего импульса таймер необходимо перезапустить.

Выходной сигнал таймера прерывает работу процессора путем установки его в начальное состояние. Микропроцессор формирует запускающие импульсы в необходимой последовательности.



Рис. 9.22г. Блок-схема привода с обратной связью, управляемого микропроцессором

Блок-схема привода с обратной связью, управляемого микропроцессором, изображена на рис. 9.22г. Угол включения тиристоров выпрямителя регулируется так, чтобы получить заданную скорость вращения электродвигателя. Для управления углом включения используется отклонение текущего значения тока потребления электродвигателем от установленного значения тока. Текущее значение тока потребления измеряется с помощью датчика постоянного тока. Для задания установленного значения тока используется отклонение текущего значения скорости вращения от установленного значения скорости вращения. Текущее значение скорости вращения в цифровой системе измеряется кодовым датчиком углового положения вала. Выходное значение кодового датчика вводится в микропроцессор через цифровой интерфейс. Отклонение скорости вращения и тока от установленных значений вычисляется микропроцессором. Выходные значения кодов пропорционально-интегрирующих (ПИ) регуляторов изменяются в зависимости

от вычисленных отклонений скорости вращения и тока. Угол включения тиристоров изменяется таким образом, чтобы текущая частота вращения стала равной установленной частоте вращения. Для увеличения частоты вращения нужно уменьшить угол включения тиристоров. Среднее напряжение, приложенное к электродвигателю, увеличивается, и его скорость вращения также увеличивается.

### 9.17.2. Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя с помощью микропроцессора

Блок-схема привода с обратной связью, управляемого микропроцессором, для регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя показана на рис. 9.23.



Рис. 9.23. Блок-схема привода с обратной связью, управляемого микропроцессором, для регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя

Асинхронный двигатель питается переменным током, преобразованным в переменный ток. Конвертор и инвертор выполняют функцию преобразования переменного тока в переменный ток. Конвертором является трехфазный двухполупериодный мостовой управляемый выпрямитель. Инвертор может быть трехфазным источником тока или трехфазным источником напряжения. Частота вращения асинхронного двигателя измеряется кодовым датчиком углового положения вала. Текущее значение входного переменного тока измеряется датчиком тока. Выходной сигнал датчика тока выпрямляется и подается на вход

аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Аналого-цифровой преобразователь преобразует аналоговый сигнал в цифровой. Микропроцессор с соответствующим программным обеспечением определяет отклонение текущей скорости вращения и тока от установленных значений. Отклонение текущего значения тока от установленного значения регулирует угол включения выпрямителя. Отклонение текущего значения скорости вращения от установленного значения регулирует частоту преобразования инвертора. Регулирование производится таким образом, что отношение  $v/f$  остается постоянным. Микропроцессор формирует необходимые управляющие сигналы для конвертора и инвертора, то есть выполняет функции схемы управления. Он регулирует частоту управления инвертором таким образом, что скорость вращения асинхронного электродвигателя становится близкой к установленной скорости вращения. Программное обеспечение микропроцессора содержит основную программу и подпрограммы. Основная программа обеспечивает необходимую инициализацию и обрабатывает прерывания. Подпрограммы обеспечивают измерение скорости вращения, вычисление отклонений от установленных значений, частотную коррекцию, коррекцию напряжения питания и управление тиристорами.

### 9.17.3. Микропроцессорный привод для синхронного электродвигателя

Блок-схема регулирования скорости вращения синхронного электродвигателя показана на рис. 9.24. Микропроцессор используется для выполнения следующих функций:

1. Обеспечение надежного управления инвертором во время запуска и низкой скорости вращения электродвигателя;
2. Автоматическое отключение режима принудительного управления инвертором, когда скорость вращения электродвигателя достигнет 10 % номинальной скорости вращения;
3. Формирование необходимых управляющих сигналов для конвертора и инвертора.

Для питания синхронного электродвигателя нужен инвертор с регулируемым выходным напряжением и конвертор с регулируемой частотой преобразования. Такая система управления не охвачена обратной связью и поэтому обладает следующими недостатками: колебание скорости вращения; нестабильность скорости вращения; плохие динамические характеристики. Если электродвигатель работает

в системе, охваченной обратной связью, вышеупомянутые недостатки можно устранить. Запускающие импульсы инвертор получает от датчика положения ротора, что позволяет обеспечить абсолютную синхронизацию положения ротора по отношению к положению вращающегося магнитного поля статора. При режиме работы без обратной связи скорость вращения электродвигателя задается частотой напряжения питания, а при режиме работы с обратной связью частота напряжения питания жестко определяется заданной скоростью вращения, что устраняет колебания и нестабильность скорости вращения. Кодовый датчик углового положения вала, показанный на рисунке, выдает информацию как о скорости вращения, так и о положении ротора. Трехфазный двухполупериодный мостовой выпрямитель, соединенный с инвертором через индуктивность, работает как источник тока.

Подпрограммы регулирования тока и частоты вращения выполняют-ся по сигналам прерывания, поступающим от таймеров и интерфейса.

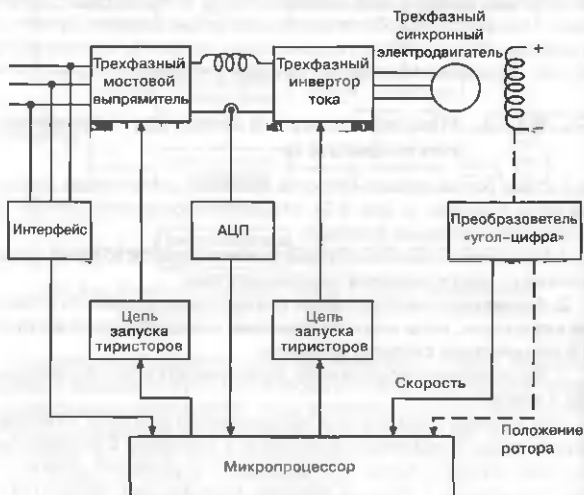


Рис. 9.24. Блок-схема привода с обратной связью, управляемого микропроцессором для синхронного электродвигателя

## Список формул для приводов электродвигателя постоянного тока

Крутящий момент на валу электродвигателя:

$$T = K\Phi I_a \quad (9.4)$$

ЭДС обмотки якоря:

$$E_b = K\Phi\omega \quad (9.5)$$

В раскрытом виде (9.4):

$$T = \left(0,159 \frac{ZP}{A}\right) \Phi I_a$$

где:

$Z$  — число пар полюсов;

$P$  — число проводников обмотки якоря;

$A$  — число пар параллельных ветвей;

$I_a$  — ток одной ветви обмотки якоря;

$\Phi$  — магнитный поток одного полюса.

Тогда:

$$E_b = \frac{\Phi Z N}{60} \frac{P}{A}$$

где  $N$  — частота вращения.

Угловая частота вращения ротора:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

В генераторе с независимым возбуждением магнитный поток  $\Phi$  постоянный. Произведение  $K\Phi$  называется константой электродвижущей силы.

Из (9.5) следует:

$$\begin{aligned} \omega &= E_b / K\Phi, \\ \omega &= \frac{V_0 - I_a R_a}{K\Phi}, \end{aligned} \quad (9.6)$$

где:

$V_0$  — напряжение на зажимах двигателя;

$R_a$  — внутреннее сопротивление цепи якоря.

1) Если электродвигатель постоянного тока питается от коммутатора:

$$V_0 = \delta E.$$

2) Если электродвигатель постоянного тока питается от однофазного двухполупериодного преобразователя:

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha.$$

3) Если электродвигатель постоянного тока питается от однополупериодного преобразователя:

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha).$$

4) Если электродвигатель постоянного тока питается от трехфазного двухполупериодного преобразователя:

$$V_0 = 1,35 \cdot V_l \cos \alpha.$$

### Задачи

**9.1.** Скорость вращения электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 12 л. с. и номинальным напряжением питания 230 В регулируется однофазным двухполупериодным преобразователем. Номинальный ток потребления двигателя 40 А,  $R_a = 0,2$  Ом и напряжение питания источника переменного тока 260 В. Константа электродвижущей силы  $K_\Phi = 1,74$  В·с/рад. Определить крутящий момент и скорость вращения электродвигателя для случая неразрывного тока питания, если угол управления тиристорами  $30^\circ$ .

*Решение*

$$K_\Phi = 1,74 \text{ В·с/рад}$$

$$I_a = 40 \text{ А}$$

$$R_a = 0,2 \text{ Ом}$$

$$V_m = 260 \text{ В}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

Поэтому крутящий момент:

$$T = K_\Phi I_a = 1,74 \cdot 40 = 69,6 \text{ Н·м};$$

$$\omega = E_b / K_\Phi; \quad \omega = \frac{V_0 - I_a R_a}{K_\Phi}$$

$$\text{Но } V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha = \frac{2 \cdot 260 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 202,8 \text{ В};$$

$$\frac{2\pi N}{60} = \frac{202,8 - 40 \cdot 0,2}{1,74}$$

$$N = 1070 \text{ об/мин.}$$



**9.2.** Скорость вращения электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 125 л. с. и напряжением 600 В регулируется трехфазным двухполупериодным преобразователем, который питается от трехфазного источника напряжения 480 В с частотой 60 Гц. Номинальный ток обмотки якоря 165 А,  $R_a = 0,0874 \text{ Ом}$ ,  $K\Phi = 0,33 \text{ В/(об/мин)}$ . Вычислить скорость вращения электродвигателя при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 30^\circ$  в случае отсутствия нагрузки. При вычислении предположить, что ток обмотки якоря непрерывный и составляет 10% от номинального значения.

*Решение*

$$K\Phi = 0,33 \text{ В/(об/мин)} = 0,33 \frac{60}{2\pi} = 3,15 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

При  $\alpha = 0$   $I_a = 10\%$  номинального тока или  $10\%$  от 165 = 16,5 А.

$$\omega = \frac{V_0 - I_a R_a}{K\Phi},$$

$$V_0 = 1,35 V_1;$$

$$V_1 = 1,35 \cdot 480 = 648 \text{ В};$$

$$\omega = (648 - 16,5 \cdot 0,0874) / 3,15,$$

Поэтому  $N = 1960 \text{ об/мин.}$

При  $\alpha = 30^\circ$   $I_a = 16,5 \text{ А}$

Но  $V_0 = 1,35 \cdot V_1 \cos \alpha = 1,35 \cdot 480 \cos 30^\circ = 561,8 \text{ В.}$

Поэтому:

$$\omega = \frac{V_0 - I_a R_a}{K\Phi},$$

$$\omega = (561,8 - 16,5 \cdot 0,0874) / 3,15,$$

$N = 1960 \text{ об/мин.}$

**9.3.** Определить эффективное сопротивление токосъемника асинхронного двигателя, управляемого коммутатором постоянного тока. Сопротивление коммутатора составляет 2 Ом. Последовательно с коммутатором включено сопротивление 4 Ом.  $T_{\text{он}} = 4 \text{ мкс}$ , а рабочая частота коммутатора 200 Гц.

## Решение

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{200} = 5 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{он}} = T - T_{\text{оф}} = 5 - 4 \text{ мкс};$$

$$\delta = \frac{T_{\text{он}}}{T} = \frac{1}{5} = 0,2;$$

$$R_a = R_1 = R_2(1 - \delta) = 4 + 2(1 - 0,2) = 5,6 \text{ Ом}.$$

**9.4.** Трехфазный 50-герцовый асинхронный электродвигатель с четырехполюсным токосъемником управляется коммутатором с время-импульсной модуляцией,  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $T_{\text{оф}} = 4 \text{ мкс}$ . Рабочая частота коммутатора 200 Гц. Коэффициент скольжения электродвигателя 2%. Вычислить развиваемый крутящий момент, если ток потребления коммутатора составляет 10 А.

## Решение

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{200} = 5 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{он}} = T - T_{\text{оф}} = 5 - 4 \text{ мкс};$$

$$\delta = \frac{T_{\text{он}}}{T} = \frac{1}{5} = 0,2;$$

$$R_a = R_1 = R_2(1 - \delta) = 4 + 2(1 - 0,2) = 5,6 \text{ Ом};$$

$$T = \frac{I_d^2 R_2}{S \omega_s};$$

$$N_s = 120 f / P = 120 \cdot 50 / 4 = 1500;$$

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ об/с};$$

$$T = \frac{10^2 \cdot 5,6}{0,02 \cdot 157} = 165 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

## Вопросы и ответы

1. Для регулирования скорости электродвигателя постоянного тока используются управляемые выпрямители. Регулировка напряжения якоря позволяет...

*Ответ.* ...получить скорость вращения электродвигателя ниже номинальной.

2. Скорость вращения асинхронного электродвигателя можно регулировать...

*Ответ.* ...за счет регулирования напряжения и частоты.

3. Широтно-импульсная модуляция применяется для...

*Ответ.* ...стабилизации крутящего момента и мощности электродвигателя.

4. Линии передачи высокого напряжения на постоянном токе экономичны...

*Ответ.* ...при передаче электроэнергии на расстояния свыше 800 км.

5. Асинхронный электродвигатель с коэффициентом скольжения 20 % имеет максимальный коэффициент полезного действия...

*Ответ.* ...80 %.

6. Высоочастотный диэлектрический нагрев используется для...

*Ответ.* ...нагрева различных видов пластмасс.

7. Разъясните преимущества и недостатки инвертора тока перед инвертором напряжения?

*Ответ*

Достоинства:

1) Использование инвертора тока позволяет применить режим регенерации.

2) Простая конструкция силовых цепей.

Недостатки:

1) Необходим фильтр с большой индуктивностью в цепи постоянного тока.

2) Коэффициент мощности источника питания уменьшается при увеличении угла управления  $\alpha$ .

8. Какие помехи в цепи источника питания могут нарушить работоспособность чувствительного оборудования?

*Ответ.* Флуктуации напряжения и частоты, импульсные помехи.

## ГЛАВА 10

# РЕЗОНАНСНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

### 10.1. Статическое преобразование мощности

Режим преобразования постоянного тока в переменный ток применяется в приводах переменного тока и источниках бесперебойного питания. В результате преобразования необходимо получить синусоидальный переменный ток, величину и частоту которого можно регулировать. Такое преобразование обеспечивается с помощью инвертора, вход которого подключен к источнику постоянного напряжения. В результате преобразования инвертор выдает требуемое переменное напряжение.

В последние годы технологии электронного преобразования электрических мощностей значительно развились. В современных системах преобразования требуется получить большие рабочие удельные мощности, быстрые переходные характеристики, малые электромагнитные помехи, низкие гармонические составляющие, малые входные пульсации. Кроме того, система преобразования должна обладать высокой надежностью и способностью эффективно работать на высоких частотах переключения.

Технология широтно-импульсной модуляции (ШИМ) обычно используется в инверторах для питания асинхронных и синхронных электродвигателей в целях минимизации пульсаций крутящего момента. Но в инверторах с широтно-импульсной модуляцией увеличены коммутационные потери из-за того, что в момент переключения напряжение и ток ключа не равны нулю, что существенно снижает эффективность преобразования мощности.

В резонансных инверторах коммутационные потери минимальные, поскольку включение и выключение ключа происходят в моменты времени, когда напряжение и ток в цепи проходят через нулевое значение. Резонансный инвертор со связью по постоянному току широко используется в различных мощных источниках питания, так как для него не требуются ключи с большими пиковыми токами и импульсными рабочими напряжениями в отличие от других типов резонансных инверторов.

## 10.2. Преимущества переключения при нулевом напряжении

1. Низкие коммутационные потери и низкие перегрузки в ключевых элементах по причине их включения и выключения при нулевом напряжении и токе.

2. Дальнейшее снижение коммутационных потерь инвертора при генерации только синусоидального выходного напряжения и тока.

3. Достигаются более высокие частоты переключений.

4. Уменьшается уровень электромагнитных помех.

5. Уменьшаются габариты магнитных элементов.

6. Отсутствует дополнительный акустический шум.

7. Достигается более высокий уровень удельной мощности.

8. Значительно уменьшаются размер и вес инвертора.

9. Обеспечивается высокая эффективность работы инвертора в широком диапазоне изменения нагрузки.

## 10.3. Недостатки переключения при нулевом напряжении

В момент переключения при нулевом напряжении на закрытом ключе возникает прямое напряжение, которое выше, чем входное напряжение питания  $V_d$  на величину  $Z_0 I_0$ , где  $Z_0$  — характеристический импеданс цепи. Для обеспечения нулевого напряжения коммутирования ток нагрузки  $I_0$  должен быть больше, чем  $V_d/Z_0$ . Поэтому, если ток нагрузки  $I_0$  изменится в широких пределах, номинальные рабочие напряжения ключей должны быть достаточно высокими. Следовательно, применение такого способа переключения, по сути, эффективно в случае постоянной нагрузки.

## 10.4. Резонансный преобразователь со связью по постоянному току

### 10.4.1. Введение

В режиме работы преобразователя постоянного напряжения в переменное с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), входное постоянное напряжение является фиксированной величиной, а заданное выходное напряжение можно получить путем выбора режима ШИМ. Однако в преобразователе со связью по постоянному току нагрузка источника постоянного напряжения является высокочастотной, так как ток потребления преобразователя с ШИМ в каждом периоде преобразования пересекает нулевой уровень. Таким образом, достижение оптимальных условий работы преобразователя зависит от характеристик других приборов, подключенных параллельно к шине питания постоянного напряжения. Резонансный преобразователь, работающий в режиме широтно-импульсной модуляции, также не может обеспечить постоянство нагрузки источника питания при некоторых режимах его работы.

### 10.4.2. Принцип работы



Рис. 10.1. Резонансный преобразователь со связью по постоянному току

Рассмотрим схему, показанную на рис. 10.1, в которой для питания нагрузки используется однополярное напряжение. Резонансная  $LC$ -цепь включена между источником питания и нагрузкой. Мощный транзистор, включенный параллельно конденсатору, обеспечивает регулирование

выходного напряжения. Мощный транзистор переключается на фиксированной частоте  $f_s$  с регулируемой длительностью рабочего цикла, как показано на рис. 10.2.

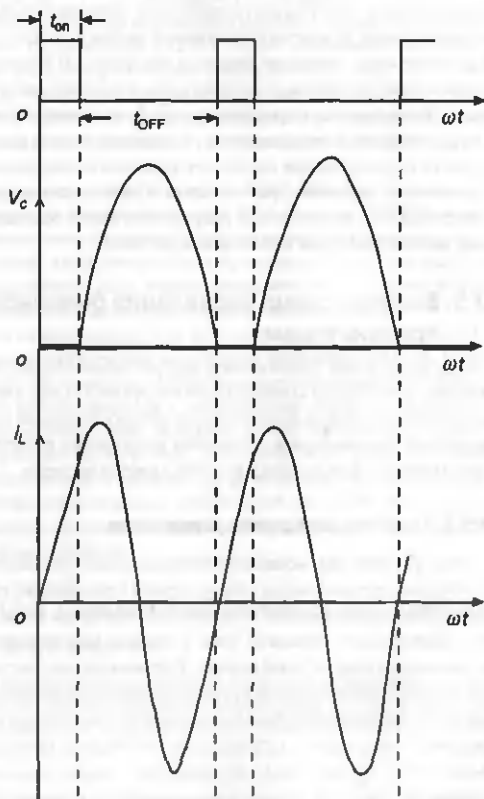


Рис. 10.2. Напряжение на конденсаторе и ток индуктивности

Когда транзистор  $T_1$  на протяжении времени  $t_{on}$  находится во включенном состоянии, протекающий через индуктивность  $L$  ток линейно возрастает. В течение времени  $t_{off}$  выключенного состояния транзистора вследствие резонанса через емкость протекает синусоидальный ток. В первом полупериоде квазисинусоидальной волны конденсатор заряжается до удвоенного значения входного постоянного напряжения, а затем разряжается до нулевого напряжения в течение следующего полупериода. Далее процесс переключения на фиксированной частоте с заданным рабочим циклом повторяется, вследствие чего на конденсаторе появляется периодическое квазисинусоидальное напряжение.

Для управления мощным транзистором в резонансном преобразователе со связью по постоянному току используется базовая схема управления, рассматриваемая в следующем разделе.

## 10.5. Базовая схема управления биполярным транзистором

Базовая схема управления биполярным транзистором должна обеспечить включение транзистора за самое короткое время для минимизации потерь включения. Далее она должна обеспечить достаточный ток базы для поддержания транзистора в состоянии насыщения и обеспечить быстрое выключение транзистора в нужный момент времени.

### 10.5.1. Особенности схемы управления

Базовая схема управления мощными биполярными транзисторами значительно сложнее схемы запуска тиристоров. Необходимый ток базы транзистора существенно больше тока запуска тиристора из-за малого значения коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером мощного высоковольтного транзистора. Следовательно, логическая схема неспособна непосредственно управлять мощным транзистором. Для обеспечения необходимого тока базы мощного транзистора используется промежуточное звено, состоящее из биполярных транзисторов средней мощности. Это приводит к дополнительному рассеянию мощности в управляющей цепи и в цепи базы мощного транзистора, что требуется принимать во внимание.



### 10.5.2. Описание базовой схемы управления

Базовая схема управления мощным биполярным транзистором, показанная на рис. 10.3, разработана с учетом вышеизложенных особенностей. Для такой схемы управления необходим двухполярный источник питания с напряжением  $\pm 12$  В. Стабилизированный источник питания состоит из трансформатора с центральным отводом от вторичной обмотки, обеспечивающего переменное напряжение 15 В на каждой половине вторичной обмотки, мостового выпрямителя с фильтром и последовательных линейных стабилизаторов напряжения типа 7812 и 7912.

Диаграмма управления током базы мощного транзистора формируется микропроцессором типа 8255. Оптрон МСТ2Е используется для обеспечения гальванической развязки микропроцессора и схемы управления. Анод светодиода оптрона соединен с логическим выводом микропроцессора 8255, а катод соединен с общей шиной микропроцессорной системы через токоограничивающий резистор.

При каждом приходе на анод светодиода оптрона МСТ2Е единичного логического уровня включаются транзисторы  $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_3$  и соответственно  $Q_5$ . На резисторе 150 Ом появляется положительное напряжение, которое прикладывается к эмиттерному переходу мощного высоковольтного транзистора. Когда на аноде светодиода оптрона МСТ2Е нулевой логический уровень, транзисторы  $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_3$  и соответственно  $Q_5$  выключаются, а транзистор  $Q_2$  включается, на резисторе 150 Ом появляется отрицательное напряжение, эмиттерный переход мощного транзистора смещается в обратном направлении, что обеспечивает его быстрое выключение.

## 10.6. Однофазный резонансный инвертор

### 10.6.1. Введение

Целью большинства разработок приводов переменного тока является улучшение формы выходного напряжения и тока, а также снижение коммутационных потерь в мощных переключающих элементах. Схема инвертора источника напряжения имеет простую структуру силовых цепей, и ее алгоритм управления предельно прост. Эта схема также обеспечивает полную регенерацию мощности между источником постоянного напряжения и переменного тока нагрузки.

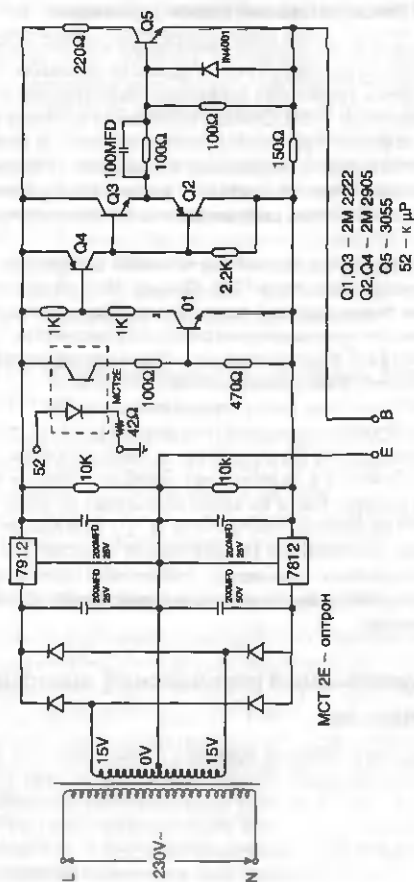


Рис. 10.3. Базовая схема управления биполярным транзистором

Однако при использовании этой схемы возникают следующие проблемы:

- в результате низких частот переключения появляются большие коммутационные потери;
- высокое значение  $dv/dt$  вследствие емкостной связи генерирует в выходном напряжении инвертора высокочастотные помехи;
- взаимодействие процесса обратной регенерации и процесса демпфирования на диоде является причиной больших перегрузок в схеме;
- низкая эффективность характеристики регенерации;
- наличие нежелательного акустического шума на частоте преобразования.

Однако увеличение частоты переключения преобразования при минимизации величины гармоник низшего порядка достигается путем использования инвертора с ШИМ, но коммутационные потери при этом будут высокие. Следовательно, оптимальным является преобразователь мощности с нулевыми коммутационными потерями, способный работать на высокой частоте, с возможностью работать в мультиквадрантном режиме, схема которого содержит реактивные компоненты с низким импедансом. Это может быть достигнуто с помощью квазирезонансного инвертора, обеспечивающего знакопеременный ток нагрузки шины источника постоянного напряжения на высокой частоте. Таким образом, создаются идеальные рабочие условия для других приборов, подключенных параллельно к этой шине.

### 10.6.2. Однофазный резонансный инвертор с резистивной нагрузкой

Однофазный транзисторный резонансный инвертор, показанный на рис. 10.4, преобразует постоянное напряжение в низкочастотное переменное напряжение, состоящее из усредненного по времени набора высокочастотных импульсов. Резонансный контур, состоящий из индуктивности  $L_2$  и конденсатора  $C_2$ , обеспечивает передачу энергии между источником постоянного напряжения и мостовой схемой на транзисторах.

Рабочие режимы резонансного инвертора с резистивной нагрузкой показаны на рис. 10.5. Формы сигналов выходного напряжения с четырьмя импульсами на один полупериод выходного напряжения и сигналы схемы управления на базах транзисторов  $T_1$ — $T_4$  показаны на рис. 10.6.

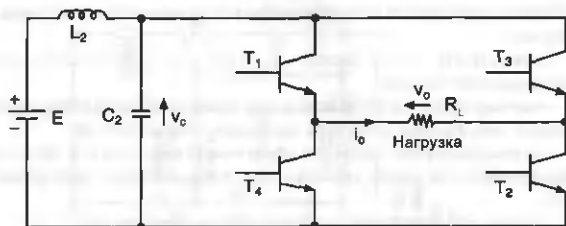


Рис. 10.4. Однофазный резонансный инвертор с резистивной нагрузкой

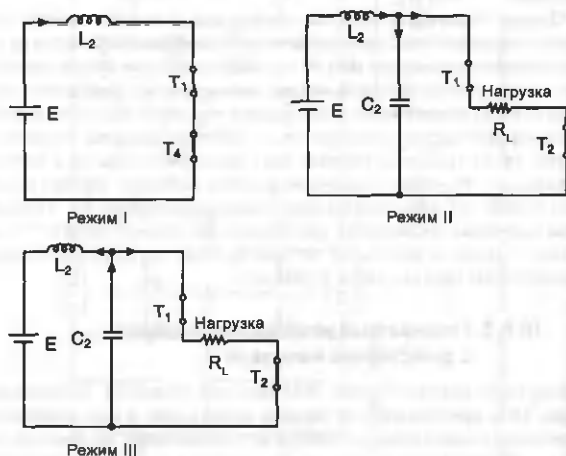


Рис. 10.5. Режимы работы однофазного резонансного инвертора с резистивной нагрузкой

**Режим I ( $t_0, t_1$ )**

Ток через индуктивность резонансного контура линейно нарастает, когда ключи  $T_1$  и  $T_4$  одновременно включаются в течение времени  $t_{on}$ . При этом напряжение на конденсаторе равно нулю. В момент времени  $t_1$  транзистор  $T_4$  закрывается и схема переходит в рабочий режим II.

Режим II ( $t_1, t_2$ )

После включения транзистора  $T_2$  в момент времени  $t_1$  на нагрузке появляется положительный резонансный импульс выходного напряжения. Источник питания при этом является источником тока нагрузки и зарядного тока конденсатора. Далее запасенная энергия в индуктивности передается на конденсатор. Режим II заканчивается, когда напряжение на конденсаторе достигает величины  $2E$ .

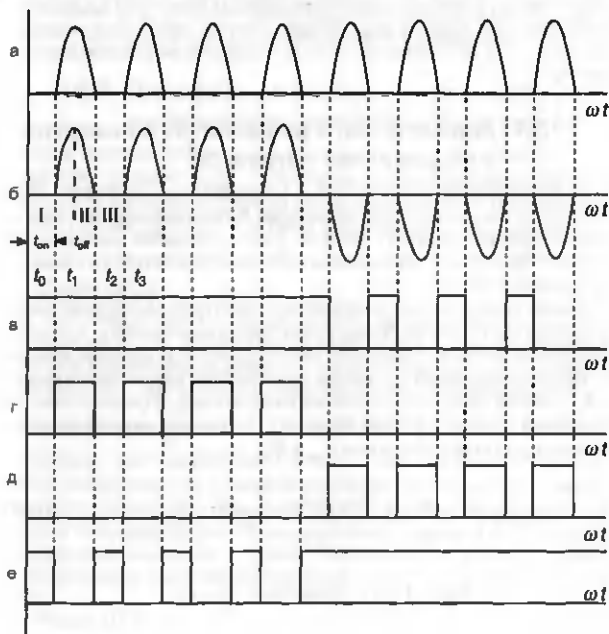


Рис. 10.6. Формы сигналов инвертора в случае резистивной нагрузки:

а) напряжение на конденсаторе;

б) выходное напряжение инвертора;

в — г) сигналы схемы управления на базах транзисторов  $T_1$ — $T_4$ .

### Режим III ( $t_2, t_3$ )

Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  по-прежнему находятся в открытом состоянии. Конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки и источник питания. Этот режим работы прекращается, когда напряжение на конденсаторе достигает нулевого значения, при этом транзистор  $T_2$  выключается, а транзистор  $T_4$  включается.

Такой процесс включения и выключения повторяется заданное количество раз в течение каждого полупериода выходного напряжения. Таким образом, генерируется низкочастотное переменное напряжение, состоящее из усредненного по времени набора высокочастотных импульсов.

## 10.7. Анализ работы резонансного инвертора с резистивной нагрузкой

Когда два транзистора  $T_1$  и  $T_2$  или  $T_3$  и  $T_4$  одновременно находятся в проводящем состоянии, резистивная нагрузка  $R_L$  подсоединена параллельно конденсатору резонансного контура. В этом состоянии конфигурация цепи преобразуется в резонансную цепь преобразователя со связью на постоянном токе.

Квазисинусоидальное напряжение в такой цепи обеспечивается путем надлежащего выбора времени включенного состояния  $t_{on}$  или путем уравнивания энергии, запасенной в индуктивности  $L_2$  в течение времени включенного состояния  $t_{on}$  энергии, рассеиваемой в резистивной нагрузке  $R_L$  в течение времени выключенного состояния  $t_{off}$ . Предположим, что запасенная энергия в течение времени  $t_{on}$  и отданная энергия в течение времени  $t_{off}$  есть соответственно  $W_{on}$  и  $W_{off}$ .

$$W_{on} = \int_0^{t_{on}} V(t)i(t)dt = \frac{V^2}{2L_2} t_{on}^2; \quad (10.1)$$

$$W_{off} = \int_0^{t_{off}} \frac{V^2}{R_L} (1 - \cos \omega t)^2 dt = \frac{1,5V^2}{R_L} t_{off}; \quad (10.2)$$

Запасенная и отданная энергии в течение одного полупериода должны быть равны для выполнения условия генерации квазисинусоидального напряжения, следовательно, уравнения (10.1) и (10.2) также должны быть равны.

Отсюда следует, что:

$$t_{\text{он}} = \frac{\sqrt{3L_2 t_{\text{офф}}}}{\sqrt{R_L}}, \quad (10.3)$$

$$t_{\text{офф}} = 2\pi\sqrt{L_2 C_2}. \quad (10.4)$$

Из уравнения (10.3) следует, что количество энергии, запасенной в индуктивности  $L_2$  в течение времени включенного состояния  $t_{\text{он}}$ , зависит от величины нагрузочного сопротивления  $R_L$  и резонансной частоты.

### 10.8. Однофазный резонансный инвертор с резистивно-индуктивной нагрузкой

Рабочие режимы резонансного инвертора с резистивно-индуктивной нагрузкой показаны на рис. 10.7. Формы сигналов выходного напряжения с двумя импульсами на один полупериод выходного напряжения и сигналы схемы управления на базах транзисторов  $T_1$  —  $T_4$ , показаны на рис. 10.8.

#### Режим I ( $t_0, t_1$ )

Ток через индуктивность резонансного контура линейно нарастает, когда ключи  $T_1$  и  $T_4$  одновременно включаются в течение времени  $t_{\text{он}}$ . При этом напряжение на конденсаторе равно нулю. В момент времени  $t_1$  транзистор  $T_4$  закрывается и схема переходит в рабочий режим II.

#### Режим II ( $t_1, t_2$ )

После включения транзистора  $T_2$  в момент времени  $t_1$  на нагрузке появляется положительный резонансный импульс выходного напряжения. Источник питания при этом является источником тока нагрузки и зарядного тока конденсатора. Далее запасенная энергия в индуктивности передается на конденсатор. Режим II заканчивается, когда напряжение на конденсаторе достигает величины  $2E$ .

#### Режим III ( $t_2, t_3$ )

Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  остаются во включенном состоянии. Конденсатор разряжается через нагрузку и источник постоянного напряжения. Режим III заканчивается, когда напряжение на конденсаторе достигает нулевого значения.

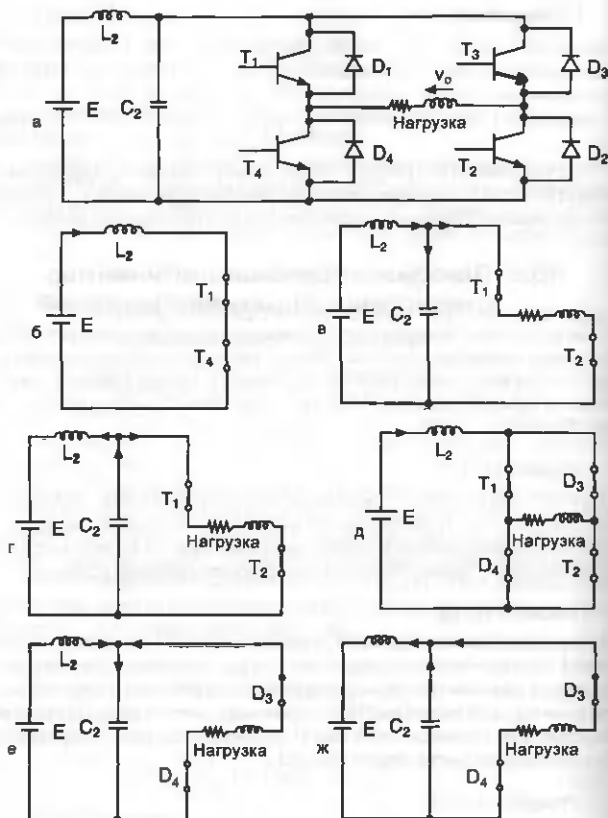


Рис. 10.7. Режимы работы однофазного резонансного инвертора с резистивно-индуктивной нагрузкой;  
а) схема инвертора;  
б — ж) режимы работы I—VI



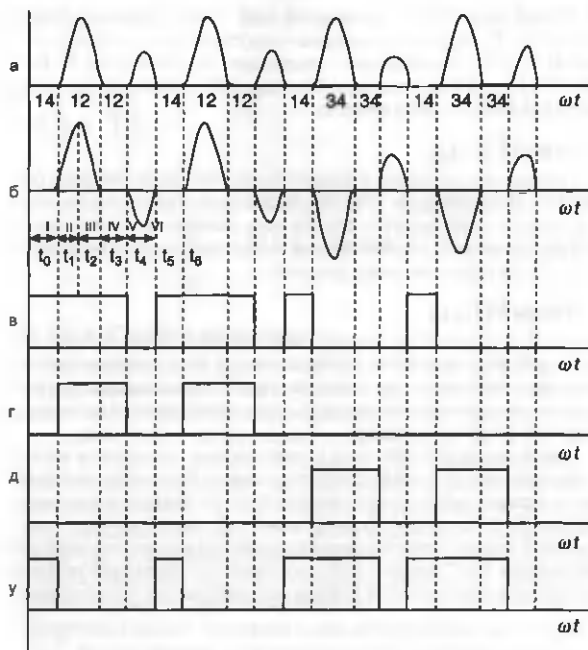


Рис. 10.8. Формы сигналов инвертора в случае резистивно-индуктивной нагрузки:  
 а) напряжение на конденсаторе;  
 б) выходное напряжение инвертора;  
 в — е) сигналы схемы управления на базах транзисторов  $T_1$  —  $T_4$ .

#### Режим IV ( $t_3, t_4$ )

Диоды  $D_3$  и  $D_4$  смещены в прямом направлении за счет напряжения на нагрузке. В схеме присутствует небольшой сквозной ток, поскольку транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  мгновенно не выключаются. Ток в схеме может протекать в трех направлениях.

Первое направление протекания тока — через нагрузку, диод  $D_3$  и транзистор  $T_1$ , второе направление — через нагрузку, транзистор  $T_2$  и диод  $D_4$  и третье направление — через диод  $D_4$ , транзистор  $T_1$ , индуктивность  $L_2$  и источник питания. Напряжение на конденсаторе остается нулевым в течение этого времени.

### Режим V ( $t_4, t_5$ )

Все транзисторы находятся в выключенном состоянии. Энергия, сохраненная в индуктивности нагрузки, передается обратно в конденсатор. Ток конденсатора является суммой тока источника и тока нагрузки. Этот режим продолжается до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не достигнет своего пикового значения.

### Режим VI ( $t_5, t_6$ )

Диоды  $D_3$  и  $D_4$  остаются смещенными в прямом направлении. Электрический ток через конденсатор изменяет свое направление, и ток источника питания теперь является суммой тока конденсатора и тока нагрузки. Этот режим прекращается, когда напряжение на конденсаторе достигнет нулевого значения.

Такой процесс включения и выключения повторяется заданное количество раз в течение каждого полупериода выходного напряжения. Таким образом, генерируется низкочастотное переменное напряжение, состоящее из усредненного по времени набора высокочастотных импульсов. В течение отрицательного полупериода выходного напряжения, транзисторы  $T_3$  и  $T_4$  находятся в проводящем состоянии и рабочий режим схемы аналогичен рабочему режиму положительного полупериода.

## ГЛАВА 11

# КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 11.1. Общие вопросы

В коммутрующих цепях преобразователя магнитные элементы и конденсаторы играют важную роль в накоплении, хранении и передаче энергии, а также фильтрации пульсаций выходного напряжения. Так как требуемые номиналы и геометрические размеры магнитных компонентов и конденсаторов уменьшаются с увеличением частоты, для достижения высокой удельной мощности преобразователя необходимо увеличение его рабочей частоты. Однако коммутирование индуктивной нагрузки на высоких частотах, как в случае импульсных преобразователей, влечет за собой большие выбросы напряжения и увеличение потерь в полупроводниковых приборах. Общепринятый метод уменьшения выбросов напряжения при коммутации заключается в использовании демпфирующих цепей. Типичная схема демпфирования показана на рис. 11.1. Важно заметить, что использование демпфирующих цепей не устраняет коммутационные потери и перегрузки в цепях преобразователя, а просто переносит их с полупроводниковых приборов на сами демпфирующие цепи.

### 11.2. Переключение при нулевом токе

Дальнейшим развитием метода принудительной коммутации является метод переключения при нулевом токе, предложенный Ли и рядом других авторов.

Замена обычных ключей в преобразователе с широтно-импульсной модуляцией резонансными ключами позволила создать новый тип

квазирезонансных преобразователей. Этот новый тип преобразователей представляет собой нечто среднее между преобразователями с широтно-импульсной модуляцией и резонансными преобразователями. В их основе лежат принцип индуктивного или емкостного накопления энергии и передача ее в нагрузку, так же как в преобразователе с широтно-импульсной модуляцией. Схема квазирезонансного преобразователя напоминает схему преобразователя с широтно-импульсной модуляцией. Однако в схеме квазирезонансного преобразователя всегда присутствует колебательный  $LC$ -контур, к которому подключен силовой ключ.  $LC$ -контур в такой схеме используется не только для формирования временной диаграммы тока и напряжения силового ключа, но также для накопления и передачи энергии от источника питания к нагрузке, так же как в обычном резонансном преобразователе.

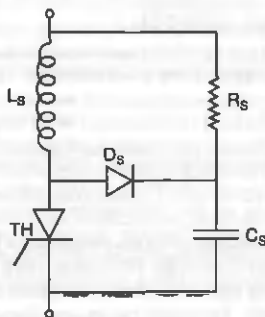


Рис. 11.1. Типичная схема демпфирования

### 11.3. Схемы резонансных ключей

Резонансный ключ представляет собой узел схемы, состоящий из полупроводникового ключа, подключенного к  $LC$ -элементам, образующим резонансную цепь, в которой происходит формирование временной диаграммы тока и напряжения силового ключа. Синусоидальный ток, формируемый резонансным  $LC$ -контуром, создает необходимые условия для выключения полупроводникового ключа при нулевом токе, благодаря чему коммутация происходит без больших выбросов напряжения и с минимальными потерями. Применение резонансного

ключа актуально как в однополупериодных преобразователях, в которых ток может протекать только в прямом направлении, как показано на рис. 11.3б, так и в двухполупериодных преобразователях, в которых ток может протекать в двух направлениях, как показано на рис. 11.3в. Существуют резонансные ключи L-типа и M-типа. В обоих типах резонансных ключей индуктивность  $L_1$  включена последовательно с ключом  $S_1$ , что необходимо для ограничения скорости нарастания тока  $di/dt$ . Конденсатор  $C_1$  служит для накопления и передачи энергии в нагрузку. Индуктивность  $L_1$  и конденсатор  $C_1$  образуют последовательный резонансный контур колебательный процесс, которого инициируется включением ключа  $S_1$ .

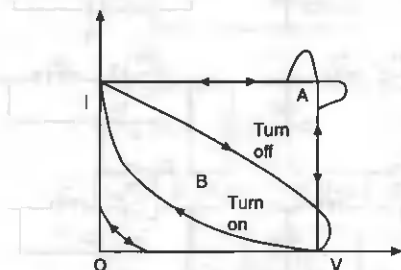


Рис. 11.2. Траектории переключения в координатах «напряжение—ток»

- A — без демпфирующей цепи;
- B — с демпфирующей цепью;
- C — резонансное переключение

Если идеальный ключ  $S_1$  проводит в одном направлении, как показано на рис. 11.3б, рабочий режим резонансного ключа однополупериодный. Если встречно с тиристором  $TH$  включить диод  $D_1$ , как показано на рис. 11.3в, тогда резонансный ключ работает в двухполупериодном режиме и ток через ключ протекает в двух направлениях.

По существу, резонансный LC-контур выполняет функцию формирования временной диаграммы тока через ключ  $S_1$ . В момент включения транзисторного ключа напряжение на нем ( $V_{CE}$  или  $V_{DS}$ ) доходит до состояния насыщения, в то время, как его ток нарастает постепенно по квазисинусоидальной форме. Вследствие резонанса в цепи  $L_1C_1$  ток, протекающий через ключ  $S_1$ , через некоторое время становится отрицательным и, таким образом, происходит естественная коммутация.

На рис. 11.2 приводятся траектории переключения в координатах «напряжение—ток» без использования демпфирующей цепи (А) и с её использованием (В).

Как видно, напряжение и номинальный ток при переключении существенно возрастают в режиме жесткой коммутации. Безопасная рабочая область резонансного ключа (С) существенно больше по сравнению с другими режимами переключения.

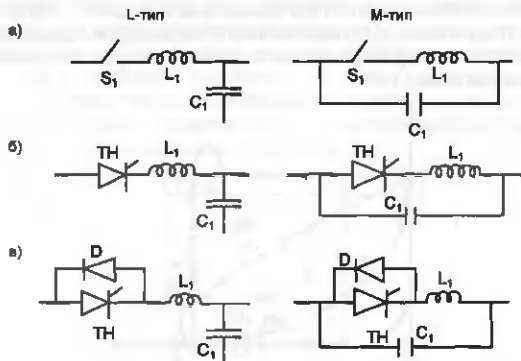


Рис. 11.3. Схемы резонансных ключей.

- а) Структурные схемы;
- б) Однополупериодные схемы;
- в) Двухполупериодные схемы

#### 11.4. Принцип действия квазирезонансного преобразователя

Структурная схема однополупериодного квазирезонансного преобразователя, работающего в режиме коммутации при нулевом токе, изображена на рис. 11.4а. Структурная схема двухполупериодного квазирезонансного преобразователя изображена соответственно на рис. 11.6а.

Чтобы проанализировать работу квазирезонансного преобразователя, предположим следующее:

— индуктивность фильтра намного больше, чем резонансная индуктивность;

- выходной фильтр совместно с нагрузкой обеспечивает постоянный ток нагрузки;
- полупроводниковые ключи идеальные, то есть прямое падение напряжения на них равно нулю в открытом состоянии, утечка тока в закрытом состоянии отсутствует и время включения-выключения равно нулю;
- реактивные элементы колебательного контура идеальные.

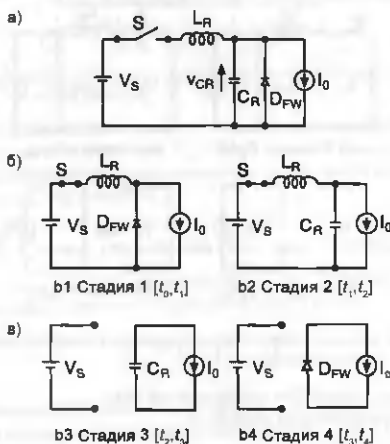


Рис. 11.4. Однополупериодный режим работы квазирезонансного преобразователя

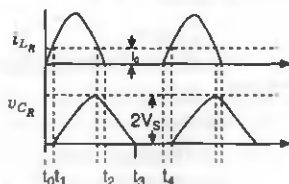


Рис. 11.5. Формы сигналов однополупериодного квазирезонансного преобразователя

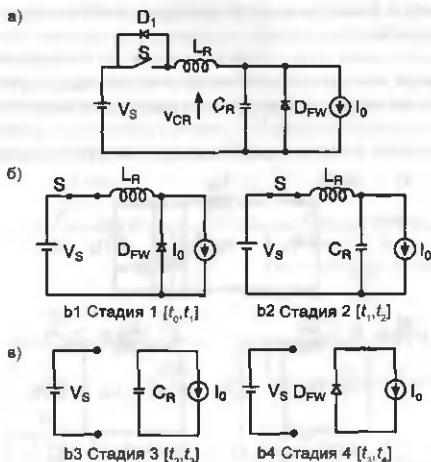


Рис. 11.6. Двухполупериодный режим работы квазирезонансного преобразователя

Следующие параметры определяются как:

— характеристический импеданс

$$Z_n = \sqrt{L_R / C_R}; \quad (11.1)$$

— резонансная угловая частота

$$\omega = 1 / \sqrt{L_R C_R}; \quad (11.2)$$

— резонансная частота

$$f_r = \omega / 2\pi. \quad (11.3)$$

Цикл работы резонансного преобразователя может быть разделен на четыре стадии. Эквивалентные схемы для этих стадий показаны на рис. 11.4 и 11.6 для однополупериодного и двухполупериодного преобразователя соответственно.



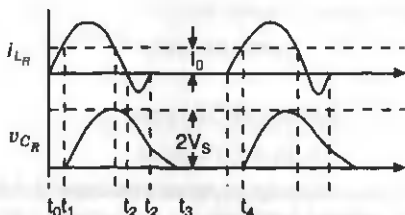


Рис. 11.7. Формы сигналов двухполупериодного квазирезонансного преобразователя

Предположим, что в начальный момент времени ток  $I_0$  диода  $D_{FW}$  и напряжение на конденсаторе  $V_{CR}$  равны нулю, а ключ  $S$  находится в выключенном состоянии. В начальный момент времени цикла переключения  $t = t_0$  ключ  $S$  включается.

#### 11.4.1. Стадия увеличения тока индуктивности ( $t_0, t_1$ )

Когда ключ  $S$  включается в момент времени  $t = t_0$ , входной ток  $i_{LR}$  нарастает линейно и подчиняется следующему выражению:

$$L_R \left[ \frac{di_{LR}}{dt} \right] = V_S \quad (11.4)$$

Время длительности этой стадии  $td_1 = (t_1 - t_0)$  может быть определено из (11.4) при использовании граничных условий  $i_{LR}(0) = 0$  и  $i_{LR}(td_1) = I_0$ . Таким образом:

$$td_1 = \frac{L_R I_0}{V_S} \quad (11.5)$$

#### 11.4.2. Резонансная стадия ( $t_1, t_2$ )

В момент времени  $t = t_1$  входной ток увеличивается до уровня  $I_0$ , диод  $D_{FW}$  смещается в прямом направлении и зарядный ток конденсатора  $C_R$  становится равным  $(i_{LR}(t) - I_0)$ . Это состояние можно записать как:

$$C_R (dV_{CR}/dt) = i_{LR}(t) - I_0 \quad (11.6)$$

$$L_R (di_{LR}/dt) = V_S - V_{CR}(t) \quad (11.7)$$

С учетом начальных условий:

$$V_{CR}(0) = 0 \text{ и } i_{LR}(0) = i_0$$

получаем:

$$i_{LR}(t) = I_0 + (V_0/Z_n) \sin \omega t; \quad (11.8)$$

$$V_{CR}(t) = V_S(1 - \cos \omega t). \quad (11.9)$$

В схеме однополупериодного резонансного преобразователя ключ  $S$  переходит в закрытое состояние при уменьшении тока на  $i_{LR}(t)$  до нулевого значения за счет резонанса в цепи. С другой стороны, в случае использования двухполупериодного резонансного ключа ток  $i_{LR}(t)$  продолжает протекать в обратном направлении и запасенная энергия передается обратно к источнику питания  $V_S$  через диод  $D_1$ . Далее ток, протекающий через диод  $D_1$ , падает до нуля. Время длительности этой стадии  $td_2 = (t_2 - t_1)$  может быть определено, если положить  $i_{LR}(td_2) = 0$ .

Таким образом:

$$td_2 = \alpha/\omega, \quad (11.10)$$

$$\text{где } \alpha = \arcsin \left[ \frac{Z_n I_0}{V_S} \right],$$

$\pi \leq \alpha \leq 3\pi/2$  для однополупериодного режима,

$3\pi/2 \leq \alpha \leq 2\pi$  для двухполупериодного режима.

В момент времени  $t_2$   $V_{CR}$  можно определить, используя уравнение:

$$V_{CR}(td_2) = V_S(1 - \cos \alpha). \quad (11.11)$$

### 11.4.3. Стадия разряда конденсатора ( $t_2, t_3$ )

Эта стадия начинается в момент времени  $t_2$ , когда ток, протекающий через индуктивность  $L_R$ , равен нулю. В момент времени  $t = t_2$ , ключ  $S$  выключается. Конденсатор  $C_R$  разряжается через нагрузку, обеспечивая в ней постоянный ток. Следовательно,  $V_{CR}$  линейно снижается и уменьшается до нулевого значения в момент времени  $t_3$ . Для этого интервала времени можно записать уравнение:

$$C_R(dV_{CR}/dt) = I_0 \quad (11.12)$$

Время длительности этой стадии  $td_3 = (t_3 - t_2)$  может быть определено при начальных условиях:

$$V_{CR}(0) = V_S(1 - \cos \alpha). \quad (11.13)$$

$$td_3 = C_R V_S(1 - \cos \alpha)/I_0. \quad (11.14)$$

#### 11.4.4. Стадия затухания ( $t_3, t_4$ )

Эта стадия начинается с включения демпфирующего диода, и ток нагрузки замыкается через диод  $D_{FW}$  в течение периода  $td_4$  до тех пор, пока снова включится транзистор  $T_1$ . Длительность этого периода составляет  $td_4 = (t_4 - t_3)$ .

## ГЛАВА 12

# СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

Преимуществами микропроцессоров являются гибкость, универсальное аппаратное обеспечение, низкая стоимость, способность к самодиагностике, легкое согласование с внешними устройствами и высокое быстродействие.

Недостатки — отсутствие доступа к промежуточным сигналам, трудности разработки алгоритмов цифровых фильтров и сложное программное обеспечение временных привязок на языке Ассемблер.

В этой главе рассматриваются два основных типа микропроцессорных управляющих схем для трехфазных преобразователей.

### 12.1. Схема управления трехфазными преобразователями, предложенная Хаем, Роем и Перретом

Эта схема содержит микропроцессор 8085, программируемый таймер 8253 и программируемый интерфейс периферийных устройств 8255. Синхронизация управляющих сигналов достигается с помощью устройства сопряжения, состоящего из детектора нулевого уровня и одновибратора. Одновибратор срабатывает по фронту выходного сигнала детектора нулевого уровня. Выходной сигнал устройства сопряжения поступает на вход «0» таймера 8253. В таймере 8253 используются два независимых счетчика, а именно счетчик «0» и счетчик «1». Блок-схема устройства управления приведена на рис. 12.1а.

Счетчик «0» таймера программируется на работу в режиме 2 и переключается при подсчете, соответствующем 60°. Счетчик таймера «1»

программируется на работу в режиме 5 и перезагружается при подсчете, соответствующем углу включения тиристора  $\alpha$ , если  $\alpha < 60^\circ$ . Если  $\alpha < 60^\circ$ , счетчик перезагружается при достижении значения угла  $\alpha = 60^\circ$ , а если  $\alpha > 120^\circ$ , счетчик перезагружается при  $\alpha = 120^\circ$ . Таким образом, временное смещение между выходными логическими уровнями таймера «0» и «1» будет соответствовать углам включения тириستоров  $\alpha = 60^\circ$  или  $\alpha = 120^\circ$ .



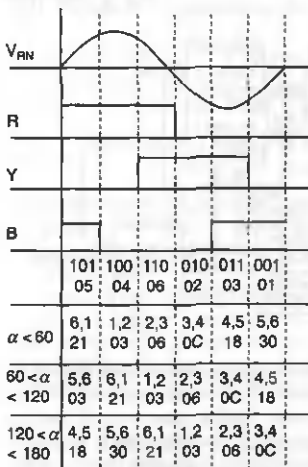
Рис. 12.1а. Блок-схема

В любой момент времени условия для запуска тириستоров определяются тремя условиями. Во-первых, запуск тиристоров возможен только после обработки прерывания, во-вторых, запуск тиристоров возможен только при определенном состоянии фаз  $R$ ,  $Y$  и  $B$  линии и, наконец, диапазон углов включения тиристоров должен находиться между 0 и  $60^\circ$ , или  $60$  и  $120^\circ$ , или  $120$  и  $180^\circ$ .

Таблица кодов управления тиристорами для трех временных интервалов приведена ниже:

$0 < \alpha < 60^\circ$		$60^\circ < \alpha < 120^\circ$		$120^\circ < \alpha < 180^\circ$	
$RYB$	Код	$RYB$	Код	$RYB$	Код
Диаграмма включения		Диаграмма включения		Диаграмма включения	
00	00	00	00	00	00
01	30	01	18	01	0C
02	0C	02	06	02	03
03	18	03	0C	03	06
04	03	04	21	04	30
05	21	05	30	05	18
06	06	06	03	06	21

Кроме таблицы кодов управления, загруженной в оперативную память, необходимо также соответствующее программное обеспечение для формирования сигналов управления тиристорами. Сигналы текущего состояния фаз *RYB* вырабатываются счетчиком таймера последовательно во времени.



Временная диаграмма импульсов управления тиристорами на логических выходах PA0-PA5

X	X	T6	T5	T4	T3	T2	T1

Если управляющее слово имеет код 0010 0001 (или в гексагональном коде 21), тиристоры T1 и T6 находятся во включенном состоянии

Состояние управляющих сигналов для фаз RYB в двоичном и гексагональном кодах

R	Y	B
PC <sub>2</sub>	PC <sub>4</sub>	PC <sub>2</sub>

Временная диаграмма включенная тиристоров и соответствующие коды

Рис. 12.16. Состояние логических выходов таймера

Генератор моделей может быть представлен в виде последовательной цепи. Логическая схема программы управления и управляющие сигналы тиристоров приведены соответственно на рис. 12.1в и 12.1г.

Недостатки этой схемы управления следующие:

1) Частотные погрешности в этой схеме не учитываются. Если частота источника питания не равна в точности 50 Гц или, если она изменяется, загруженные в таймер данные могут оказаться некорректными, вследствие чего нарушается временная диаграмма управления тиристорами;

2) Когда угол включения тиристоров уменьшается, к примеру, с  $62^\circ$  до  $58^\circ$ , один цикл прерывания будет упущен. Это можно учесть соответствующей коррекцией программного обеспечения (т. е. программы прерывания).

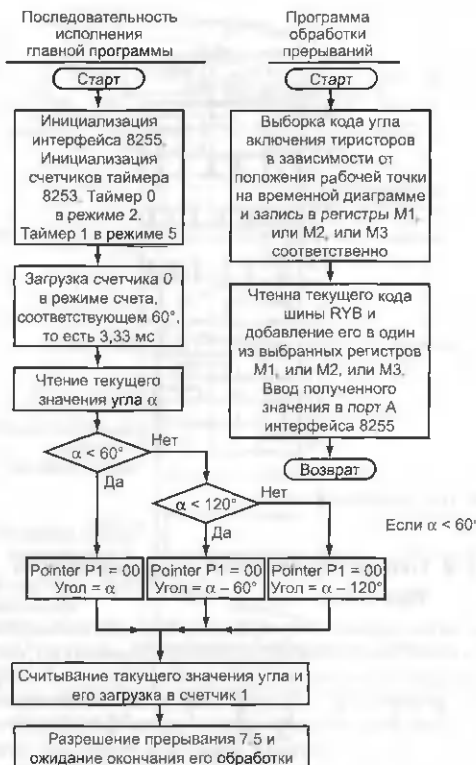


Рис. 12.1в

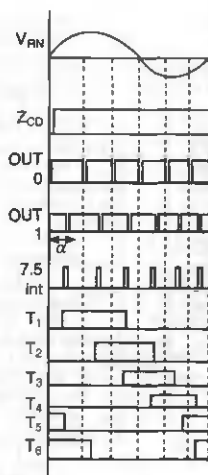


Рис. 12.1г. Временная диаграмма

## 12.2. Схема управления, предложенная Деваном

Эта схема также содержит микропроцессор 8085, программируемый таймер 8253 и программируемый интерфейс периферийных устройств 8255. В ней используются два счетчика таймера 8253. Счетчик «0» корректирует отклонение частоты источника питания от номинального значения, а счетчик «1» управляет тиристорами. Счетчик «0» программируется в режиме 0, а счетчик «1» — в режиме 2. Блок-схема управления трехфазным преобразователем приведена на рис. 12.2а. В момент перехода нулевого уровня входным напряжением  $V_{RN}$  на выходе детектора нулевого уровня формируется логический сигнал, поступающий на вход счетчика «0» таймера 8253. В начале каждого положительного полупериода входного напряжения  $V_{RN}$  процессор переходит в режим обработки прерывания по уровню 6.5 и в регистр счетчика «0» загружается код FFFF.



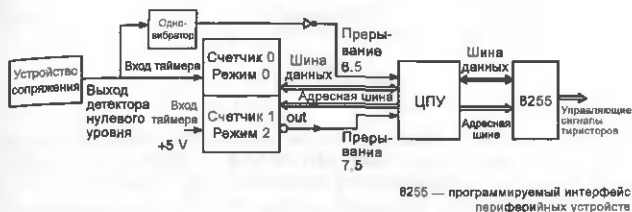


Рис. 12.2а. Блок-схема управления трехфазным преобразователем

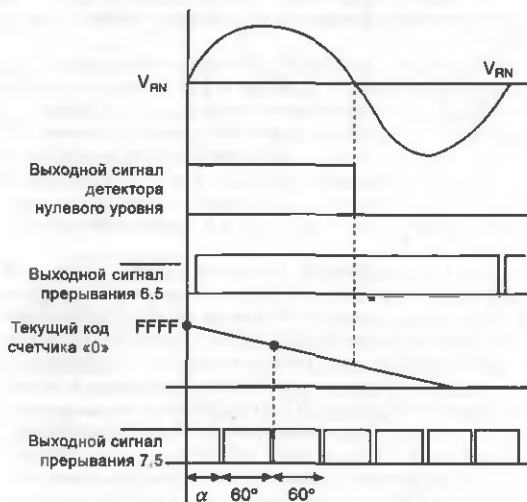


Рис. 12.2б. Временная диаграмма логических выходов

Счетчик начинает обратный отсчет с момента прихода на его вход высокого логического уровня. В любой момент времени по окончании отсчета счетчика «0» существует возможность повторной загрузки на счетчик «0» данных при значении угла более  $90^\circ$  от начала отсчета.

Тогда, если частота входного напряжения  $V_{RN}$  была 50 Гц, содержимое счетчика «0» должно быть:

$$\left[ FFFF - \frac{90}{360} \cdot \frac{1}{T_{CLK}} \right],$$

то есть для периода времени 5 мс количество циклов срабатывания счетчика «0» должно быть  $5 \text{ мс} / \text{CLK}$ , где CLK — тактовая частота таймера 8253. Если частота входного напряжения не соответствует в точности частоте 50 Гц, содержимое счетчика «0» отличается от значения  $[FFFF - 5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{CLK}]$ .

Разница между этим расчетным значением и фактическим определяет величину отклонения частоты напряжения питания от расчетного значения.

Итак, содержимое счетчика «0» считывается каждый раз при обработке второго прерывания 7.5. Если угол  $\alpha = 30^\circ$ , процесс обработки прерывания 7.5 произойдет точно в момент, когда  $\alpha = 90^\circ$ . Следовательно, в зависимости от значения угла  $\alpha$  можно вычислить содержимое регистра счетчика «0» в момент чтения (это заранее определенное значение). Когда содержимое счетчика считано, можно определить частотную погрешность как разницу между считанным и расчетным значениями. Полученная погрешность, поделенная на 6, соответствует погрешности в пределах  $60^\circ$ .

В счетчик «1» загружается рассчитанное значение угла  $\alpha$ , таким образом, программа прерывания по уровню 7.5 запускается с запозданием на угол  $\alpha$ , после перехода нулевого уровня входным напряжением. По окончании работы программы прерывания 7.5 в счетчик «1» загружается код, соответствующий углу  $60^\circ$ . Поскольку счетчик «1» запрограммирован в режиме счета 2, на его выходе присутствует непрерывная последовательность импульсов с интервалом в  $60^\circ$ . В каждом цикле перезапуска счетчика «1» на выходе периферийного интерфейса 8255 генерируются импульсы запуска тиристоров в соответствии с таблицей кодов управления.

Если угол включения тиристоров необходимо изменить, допустим с  $65^\circ$  на  $64^\circ$ , тогда в первом цикле прерывания в счетчик «1» загружается код, соответствующий углу  $59^\circ$  (вместо  $60^\circ$ ). Теперь первое включение тиристоров произойдет при значении угла  $64^\circ$ . В последующие циклы прерывания в счетчик загружается код, соответствующий углу  $60^\circ$ . Таким образом, во всех последующих циклах поддерживается постоянный сдвиг угла включения тиристоров. Структура программного обеспечения микропроцессора приведена на рис. 12.2в.

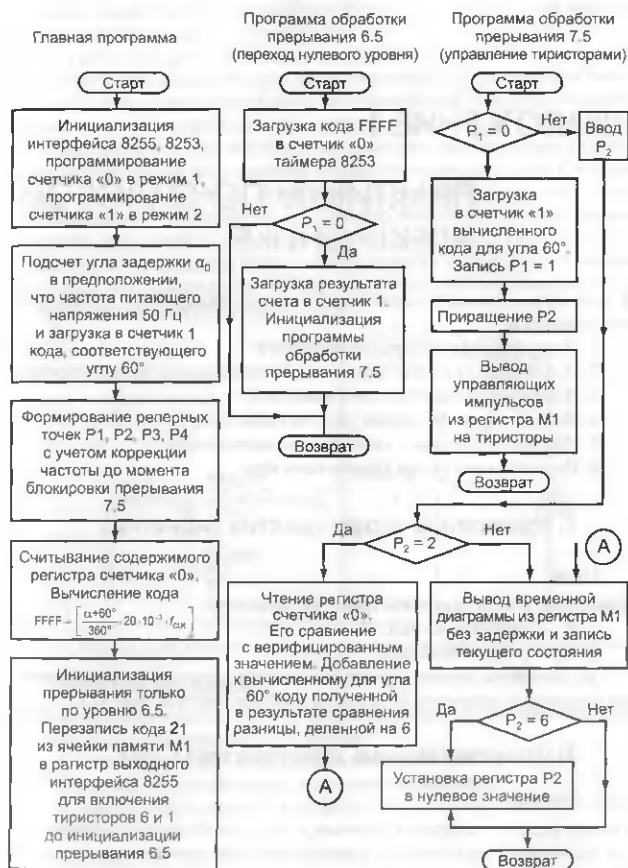


Рис. 12.2в. Структура программного обеспечения микропроцессора

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ПРАКТИКУМ ПО СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

В этом приложении рассматриваются и анализируются следующие эксперименты:

1. Измерение характеристик тиристора;
2. Исследование схемы запуска с однопереходным транзистором;
3. Измерение характеристик симистора;
4. Исследование RC-схемы запуска тиристора;
5. Исследование схемы коммутации напряжения;
6. Исследование схемы коммутации тока.

### 1. Измерение характеристик тиристора

#### Цель

Измерение следующих характеристик тиристора:

1.  $V_g - I_g$  характеристики;
2.  $V_{FB} - I_g$  характеристики.

Вышеперечисленные характеристики тиристора могут быть получены с помощью электрической схемы изображенной на рис. А1.1.

#### 1) Измерение входных характеристик ( $V_g - I_g$ )

##### Теория

Тиристор является четырехслойным  $p-n-p-n$ -прибором с тремя выводами. Вывод внешнего слоя  $p$ -типа является анодом, а вывод внешнего слоя  $n$ -типа катодом. Вывод внутреннего слоя  $p$ -типа является управляющим электродом. Этот прибор используется в качестве управляемого ключа.

Тиристор может быть включен при подаче на его управляющий электрод напряжения в прямом направлении.

Существуют различные способы включения тиристора и среди них наиболее распространенный — способ включения управляющим электродом. Тиристор включается, если на управляющий электрод приложено положительное напряжение относительно катода, при этом на аноде также должно быть положительное напряжение по отношению к катоду. Зависимость между напряжением на управляющем электроде  $V_g$  и током управляющего электрода  $I_g$  называется вольт-амперной характеристикой управляющего электрода. Между управляющим электродом и катодом включен  $p$ - $n$ -переход, следовательно, вольт-амперная характеристика управляющего электрода будет подобна характеристике диода, смещенного в прямом направлении. Эта характеристика необходима для расчета и проектирования управляющей схемы.

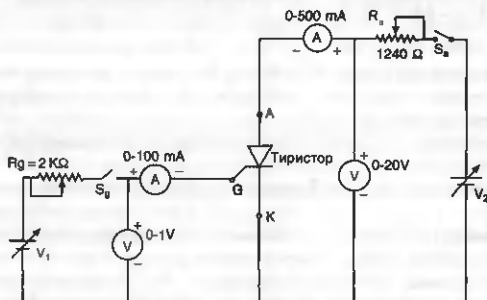


Рис. А1.1. Электрическая схема для измерения характеристик тиристора

### Методика измерения

Это измерение проводится с помощью вольтметра, амперметра, подключенных к управляющему электроду.

1. Установить ключ  $S_g$  в разомкнутое состояние.
2. Выбрать верхний предел измерения вольтметра 1 В.
3. Установить максимальную величину сопротивления потенциометра  $R_g$ .
4. Замкнуть ключ  $S_g$ .
5. Записать величины напряжения  $V_g$  и тока  $I_g$  на управляющем электроде.



6. Уменьшить величину  $R_g$  и записать новые значения напряжения и тока.

7. Повторить измерения для нескольких значений  $R_g$ .

8. Полученные данные заносятся в таблицу.

### Результаты измерений

$V_g$							
$I_g$							

### Построение вольт-амперной характеристики

Построить зависимости между напряжением  $V_g$  и током  $I_g$  управляющего электрода по результатам измерений, занесенных в таблицу.

## 2) Измерение характеристик запирания тиристора ( $V_{FB}-I_g$ )

### Методика измерения

1. Установить ключи  $S_a$  и  $S_g$  в разомкнутое состояние. Выбрать верхние пределы измерения вольтметра управляющего электрода 1 В, вольтметра анода 20 В.

2. Установить величину сопротивления потенциометра  $R_g$  таким, чтобы ток тиристора был больше его тока запирания.

3. Установить максимальную величину сопротивления потенциометра  $R_g$ .

4. Замкнуть ключи  $S_a$  и  $S_g$ . Постепенно увеличить ток  $I_g$ , уменьшая сопротивление  $R_g$  до того момента, пока тиристор не перейдет в проводящее состояние.

5. Записать минимальный ток управляющего электрода  $I_g$  и анодное напряжение тиристора  $V_{FB}$  до его перехода в проводящее состояние.

6. Установить ключи  $S_a$  и  $S_g$  в разомкнутое состояние. Увеличить напряжение на аноде тиристора и повторить измерения по п. п. 2—5.

7. Полученные данные заносятся в таблицу.

### Результаты измерений

$V_{FB}$							
$I_g$							

### Построение характеристики запирания тиристора

Построить зависимости между напряжением  $V_{FB}$  и током  $I_g$  управляющего электрода по результатам измерений занесенных в таблицу.

## 2. Исследование схемы запуска с однопереходным транзистором

### Цель

Изучение и проектирование генератора с заданной частотой на однопереходном транзисторе и управление углом включения тиристора.

### Теория

Однопереходный транзистор является трехвыводным полупроводниковым прибором, содержащим один  $p$ - $n$ -переход. Этот прибор сформирован в кремниевой области  $n$ -типа, в которой сформирована  $p$ -область, образующая  $p$ - $n$ -переход. Два вывода однопереходного транзистора, подсоединенные к кремниевой области, называются «база 1» и «база 2» ( $B_1$  и  $B_2$ ), а вывод, подсоединенный к  $p$ -области, называется эмиттером. Когда  $p$ - $n$ -переход транзистора смещен в обратном направлении, его межбазовое сопротивление  $R_{BВ}$  — высокое.

Сопротивление  $R_{BВ}$  состоит из двух последовательно включенных сопротивлений  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$ .  $R_{B1}$  — сопротивление между выводом  $B_1$  и областью  $p$ - $n$ -перехода, а  $R_{B2}$  — сопротивление между выводом  $B_2$  и областью  $p$ - $n$ -перехода.

При 25 °C значение  $R_{BВ}$  находится в диапазоне от 4 до 10 кОм и увеличивается линейно с увеличением температуры. В нормальном рабочем режиме, вывод транзистора  $B_1$  подсоединен к общей клемме источника питания, а вывод  $B_2$  к положительной клемме источника питания. Эти выводы могут быть соединены либо напрямую, либо через резисторы. Напряжение между  $B_1$  и  $B_2$  называется межбазовым напряжением  $V_{BВ}$ . Отношение падения напряжения на сопротивлении  $R_{B1}$  к межбазовому напряжению называется внутренним коэффициентом деления  $\eta$ . Значение  $\eta$  находится в диапазоне между 0,51 и 0,82, его среднее значение приблизительно равно 0,63 для наиболее распространенного типа однопереходного транзистора (2N2646).

Когда напряжение, приложенное к эмиттеру, ниже падения напряжения на  $p$ - $n$ -переходе, диод эмиттерного перехода смещен в обратном направлении. При возрастании напряжения на эмиттере диод смещается в прямом направлении и в цепи  $B_1$  начинает протекать большой ток. Напряжение  $V_p$ , при котором начинается этот процесс, называется пиковым напряжением. Это напряжение можно рассчитать по формуле  $V_p = \eta V_{BВ} + V_D$ , где  $V_D$  — падение напряжения на прямо смещенном диоде (примерно 0,5 В). Когда диод находится в состоянии проводимости, он сохраняет это

состояние даже при падении напряжения на эмиттере ниже напряжения  $V_D$ . При падении напряжения на эмиттере ниже уровня  $V_V$  диод прекращает проводить. Напряжение  $V_V$  называется напряжением впадины.

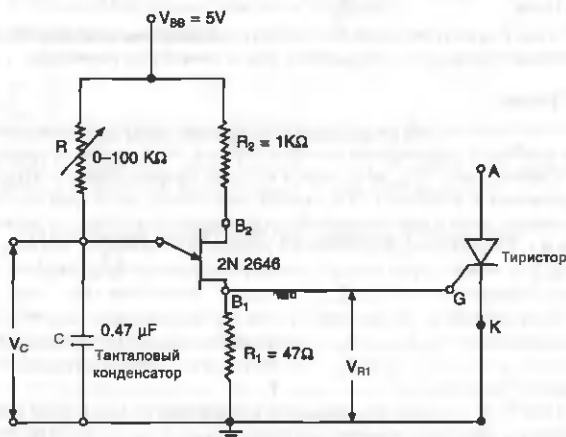


Рис. А1.2. Схема запуска тиристора на однопереходном транзисторе

### Методика исследования

Соедините элементы согласно схеме, приведенной на рис. А1.2. Измерьте период колебаний в схеме и сравните его с расчетным значением. Практически период колебаний можно измерить с помощью электронно-лучевого осциллографа, подключенного к резистору  $R_1$ . Теоретически период колебаний можно рассчитать по формуле  $T = RC \ln 1/(1 - \eta)$ .

## 3. Измерение характеристик симистора

### Цель

Определение характеристик симистора.

### Требуемые материалы и оборудование

Симистор ST44, потенциометры 50 и 210 Ом, амперметр 0—500 мА, источники питания, цифровой вольтметр.



### Теория

Симистор является двунаправленным управляемым ключом. Он используется в основном в цепях с переменным напряжением. Симистор — трехвыводной полупроводниковый прибор. Выводы  $MT_1$  и  $MT_2$  — силовые, а вывод  $G$  — управляющий электрод. Симистор может быть включен подачей положительного или отрицательного импульса на управляющий электрод.

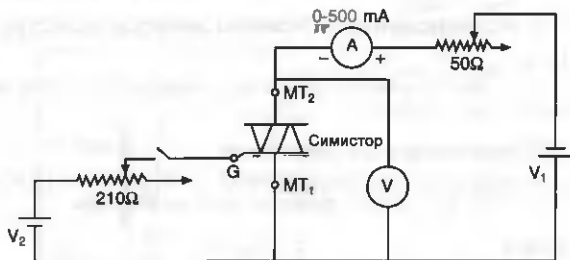


Рис. А1.3. Электрическая схема для измерения характеристик симистора

При отсутствии сигнала на управляющем электроде симистор не проводит ток в обоих направлениях в том случае, если приложенное к нему пиковое напряжение меньше, чем его пробивное напряжение. Симистор может быть включен в каждом полупериоде коммутируемого напряжения при подаче на его управляющий электрод напряжения. Ток управляющего электрода, необходимый для включения симистора, существенно меньше, если полярность напряжения на управляющем электроде совпадает с полярностью напряжения на электроде  $MT_2$ .

В общем, режимы работы симистора таковы: на  $MT_2 + V_1$ , на  $MT_1 - V_1$ , на  $G + V_2$  или на  $G - V_2$  — работа в первом квадранте; на  $MT_2 - V_1$ , на  $MT_1 + V_1$ , на  $G + V_2$  или на  $G - V_2$  — работа в третьем квадранте.

### Методика измерения

Соедините элементы согласно схеме, приведенной на рис. А1.3. Подайте на вывод симистора  $MT_2$  положительное напряжение по отношению к выводу  $MT_1$ . Включите симистор путем подачи на управляющий электрод положительного напряжения по отношению к выводу  $MT_1$ . Запишите величины падения напряжений на симисторе при различных значениях токов нагрузки.

Включите симистор путем подачи на управляющий электрод отрицательного напряжения по отношению к выводу *MT*. Запишите величины падения напряжений на симисторе при различных значениях токов нагрузки.

Ток нагрузки симистора изменяется путем изменения сопротивления потенциометра 50 Ом в цепи питания.

Построить зависимости  $V-I$  для первого и третьего квадрантов.

#### 4. Исследование *RC*-схемы запуска тиристора

##### Цель

Изучение однополупериодной *RC*-схемы управления тиристором при различных углах включения.

##### Требуемые материалы и оборудование

Потенциометр 0—100 кОм; конденсатор 0,47 мкФ; резисторы 1,5 кОм, 33 кОм и 1 кОм; диод 1N4001; тиристор; лампа накаливания.

##### Теория

Тиристор является управляемым ключом, который переходит в проводящее состояние после прихода запускающего импульса положительной полярности на управляющий электрод в случае присутствия на аноде положительного напряжения. При отрицательном напряжении на аноде тиристор запирается и ток не проводит.

При положительном полупериоде напряжения конденсатор *C* начинает заряжаться через резистор *R*. При достижении на нем определенного напряжения тиристор запускается.

При отрицательном полупериоде напряжения тиристор обратно смещен, при этом к управляющему электроду не должно прикладываться отрицательное напряжение. Это обеспечивается диодом *D*, включенным в цепь управления тиристором, который находится в проводящем состоянии, только когда напряжение на конденсаторе положительно. Угол включения тиристора можно регулировать путем изменения постоянной времени *RC*-цепи.

##### Методика исследования

1. Соедините элементы согласно схеме, приведенной на рис. А1.4.
2. Установите на выходе автотрансформатора напряжение 30 В. Яркость лампы накаливания (ток через резистор) можно регулировать изменением сопротивления потенциометра.

3. Наблюдайте с помощью осциллографа за формой выходного напряжения на лампе накаливания.

4. Запишите время нахождения тиристора в проводящем состоянии и время задержки включения тиристора при различных значениях сопротивления потенциометра и исходя из этого вычислите углы запуска.

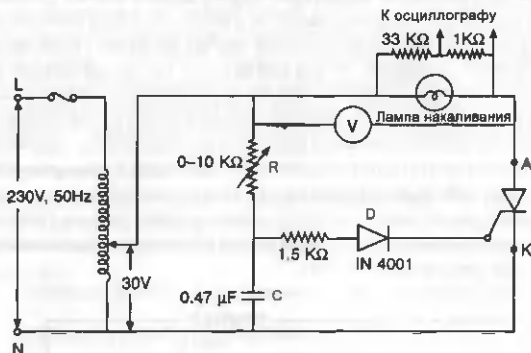


Рис. А1.4. RC-схема запуска тиристора

## 5. Исследование схемы коммутации напряжения

### Цель

Изучение влияния начального напряжения на коммутирующем конденсаторе и величины емкости конденсатора на величину коммутируемых токов.

### Теория

Коммутирование — это процесс перераспределения тока с одного тиристора на другой тиристор или на тиристор, находящийся в выключенном состоянии. Для нормальной коммутации должны быть соблюдены три условия:

- 1) ток через тиристор должен быть снижен до нулевого значения;
- 2) к тиристорному должно быть приложено обратное напряжение  $V_{rev}$ ;
- 3) обратное напряжение на тиристоре должно поддерживаться в течение времени большего, чем время выключения тиристора  $t_{off}$ .

Если вышеперечисленные условия не выполняются, оптимальная коммутация тиристора невозможна. Вышеупомянутые условия легко выполняются, если к тиристорному приложено переменное напряжение, или если напряжение на нагрузке, подключенной к тиристорному, затухающее. Технология коммутирования в первом случае называется коммутацией входным напряжением или естественной коммутацией, а во втором случае — коммутацией за счет нагрузки. Если входное напряжение постоянное, то для коммутации тиристора требуется дополнительная цепь. Коммутирование этого типа называется **принудительной коммутацией**. Цепь принудительной коммутации содержит заряженный с противоположной полярностью конденсатор. Заряженный конденсатор можно подсоединить либо напрямую к коммутируемому тиристорному, либо через индуктивность. При коммутировании напряжения заряженный конденсатор напрямую подключается к тиристорному, а при коммутировании тока заряженный конденсатор подключается к тиристорному через индуктивность.

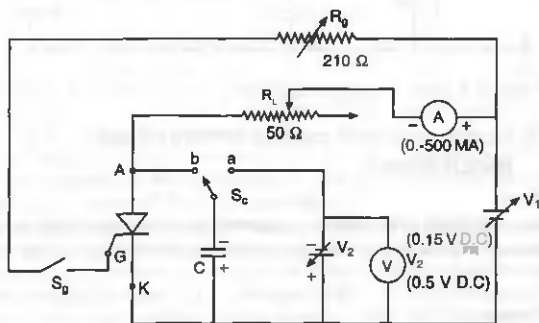


Рис. А1.5. Схема коммутации напряжения

Схема коммутации напряжения приведена на рис. А1.5. Когда заряженный конденсатор подсоединяется к тиристорному, находящемуся в проводящем состоянии, он разряжается и ток разряда протекает через тиристор в обратном направлении, при этом ток тиристора падает до нулевого значения практически мгновенно (условие «а»). После того как ток тиристора снизился до нулевого значения, конденсатор начинает



перезаряжаться через резистор  $R$ . Напряжение на конденсаторе при этом уменьшается и через некоторое время достигает нулевого значения. В этот промежуток времени к тиристорному приложено обратное напряжение (условие «б»). Время нахождения тиристора при обратном смещении зависит от величины емкости конденсатора, начального напряжения на конденсаторе и тока тиристора в начальный момент процесса коммутирования. Величины емкости конденсатора и его начального напряжения необходимо выбрать такими, чтобы время обратного смещения было больше времени выключения тиристора (условие «в»). Максимальный ток, который может коммутироваться выбранным конденсатором, заряженным до начального напряжения  $V_1$ , называется максимальным коммутируемым током  $I_{\text{ком}}$ .

### Методика исследования

Установить выходное напряжение источника питания  $V_1$  на уровне 10 В и выбрать величину сопротивления  $R_L$  такую, чтобы ток через тиристор был бы приблизительно 0,5 А, когда тиристор находится в проводящем состоянии.

1. Установить выходное напряжения источника питания  $V_2$  на уровне 5 В.

2. Установить ключ  $S_c$  в положение «а».

3. Запустить тиристор, замкнув ключ  $S_g$  и выбрав ток управляющего электрода потенциометром  $R_g$ . После запуска тиристора разомкнуть ключ  $S_g$ .

4. Перевести ключ  $S_c$  в положение «б» и проверить, включен тиристор или нет.

5. Если тиристор выключен, разомкнуть ключ  $S_c$  и запустить тиристор снова.

6. Уменьшая сопротивление  $R_L$ , увеличить ток тиристора.

7. Повторить п. 3—6 до того момента, когда коммутирование будет невозможно.

Записать максимальный анодный ток тиристора, который возможно коммутировать, и напряжение на конденсаторе  $V_2$ .

8. Повторить п. 3—7 при различных напряжениях  $V_2$ .

9. Повторить п. 1—8 при различных значениях емкости конденсатора.

### Построение характеристик коммутации тиристора

Построить зависимости максимальных коммутируемых токов  $I_{\text{ком}}$  от напряжения на конденсаторе  $V_2$  для различных значений емкости конденсатора.

## 6. Исследование схемы коммутации тока

### Цель

Изучение влияния начального напряжения на коммутирующем конденсаторе и величины емкости конденсатора на величину коммутируемых токов.

### Теория

Исследование схемы коммутации напряжения позволило установить влияние напряжения на коммутирующем конденсаторе на величину коммутируемого тока. Коммутирование тока тиристора осуществляется квазисинусоидальным возрастающим током. Принцип этого метода коммутирования рассмотрим на следующем примере.

Допустим, что конденсатор  $C$  изначально заряжен до некоторого напряжения, полярность которого показана на рис. А1.6б.

После запуска главного тиристора  $M$  через нагрузку начинает протекать ток  $I_L$ .

Для коммутации главного тиристора  $M$  запускается вспомогательный тиристор  $A$ . Поскольку тиристор  $A$  смещен в прямом направлении, он переходит в проводящее состояние и в контуре ударного возбуждения, состоящего из  $C$ ,  $L$  и  $M$ , начинает протекать квазисинусоидально возрастающий ток. В течение этого периода через тиристор  $M$  протекают два противоположно направленных тока, а именно  $I_L$  и  $I_C$ . Поскольку ток конденсатора возрастает, суммарный ток тиристора  $M$  уменьшается и становится равным нулю, когда  $I_L = I_C$ . В этот момент времени тиристор  $M$  выключается, а ток конденсатора продолжает протекать через диод  $D$ .

Ток конденсатора  $I_C$  достигает пикового значения и затем спадает. Когда этот ток становится снова равным току  $I_L$ , диод  $D$  запирается.

Когда диод  $D$  находится в проводящем состоянии, к тиристорам  $M$  приложено обратное напряжение. Обеспечение нормального режима коммутации возможно, если время обратного смещения, больше времени выключения тиристора. После выключения тиристора  $M$  и диода  $D$  ток, протекающий через  $L$ ,  $C$  и  $A$ , постепенно уменьшают до нуля. Установить выходное напряжение источника питания  $V_1$  на уровне 10 В и выбрать величину сопротивления  $R_L$  такую, чтобы ток через тиристор был бы приблизительно 0,5 А, когда тиристор  $M$  находится в проводящем состоянии (рис. А6.1а).

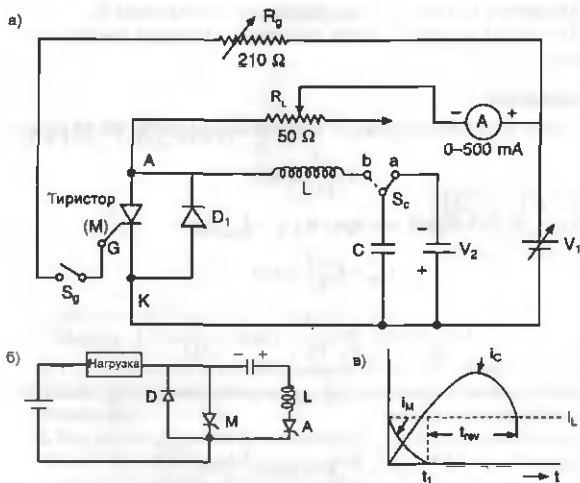


Рис. А1.6. а) Схема коммутации тока

б) Форма тока

в) Методика исследования

1. Установить выходное напряжения источника питания  $V_2$  на уровне 5 В.

2. Установить ключ  $S_g$  в положение «а».

3. Запустить тиристор  $M$ , замкнув ключ  $S_g$  и выбрав ток управляющего электрода потенциометром  $R_g$ . После запуска тиристора разомкнуть ключ  $S_g$ .

4. Перевести ключ  $S_g$  в положение «б» и проверить, включен тиристор  $M$  или нет.

5. Если тиристор выключен, разомкнуть ключ  $S_g$  и запустить тиристор снова.

6. Уменьшая сопротивление  $R_g$ , увеличить ток тиристора.

7. Повторить п. 3—6 до того момента, когда коммутирование будет невозможно.

Записать максимальный анодный ток тиристора, который возможно коммутировать, и напряжение на конденсаторе  $V_2$ .

8. Повторить пункты 3—7 при различных напряжениях  $V_2$ .

9. Повторить пункты 1—8 при различных значениях емкости конденсатора.

### Вычисление

Зависимость тока конденсатора от времени определяется выражением:

$$i_c = V_2 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega t.$$

Из рис. А1.6в следует, что при  $t = t_1$   $i_c = I_{\text{com}}$ , где:

$$I_{\text{com}} = V_2 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega t_1,$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left( \frac{I_{\text{com}}}{V_2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \text{ где } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Приближенное выражение для вычисления времени  $t_{\text{rev}}$  обратного смещения тиристора будет:

$$t_{\text{rev}} = \left[ \frac{\pi}{\omega} - 2t_1 \right] = \frac{1}{\omega} \left[ \pi - 2 \arcsin \left( \frac{I_{\text{com}}}{V_2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \right].$$

### Построение характеристик коммутации тиристора

1. Построить зависимости максимальных коммутируемых токов  $I_{\text{com}}$  от напряжения на конденсаторе  $V_2$  для различных значений емкости конденсатора.

2. Рассчитать зависимость времени  $t_{\text{rev}}$  обратного смещения тиристора от величины начального напряжения на конденсаторе для различных значений емкости конденсатора. Построить эти зависимости.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ

#### Часть 1

1. Тиристор — это полупроводниковый силовой прибор, управляемый током. Да или нет?

*Ответ.* Да.

2. Как можно управлять проводимостью мощного транзистора?

*Ответ.* За счет широтно-импульсной модуляции тока базы регулируется проводимость мощного транзистора.

3. Каково типичное значение падения напряжения на силовом МОП-транзисторе?

*Ответ.* Меньше 1 В.

4. Как можно защитить тиристор от чрезмерной скорости нарастания тока  $di/dt$ ?

*Ответ.* С помощью маленькой индуктивности, подключенной последовательно с тиристором.

5. Опишите однополупериодный тиристорный выпрямитель.

*Ответ*

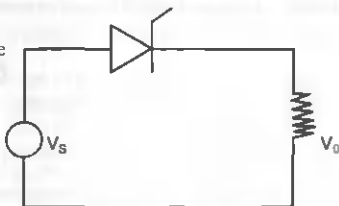
$V_s$  — напряжение питания;

$V_0$  — выходное однополярное напряжение, определяемое как

$$V_0 = \frac{V_m}{2\pi}(1 + \cos \alpha), \text{ где}$$

$$V_m = \sqrt{2}V_s$$

$\alpha$  — угол включения тиристора.



6. Какие отличия между однополупериодным и двухполупериодным тиристорными мостовыми преобразователями?

*Ответ*

Однополупериодный	Двухполупериодный
Содержит один тиристор	Содержит четыре тиристора
Одноквadrантное преобразование	Двухквadrантное преобразование
Одновременно только один тиристор находится в проводящем состоянии	Одновременно два тиристора могут находиться в проводящем состоянии
$V_0 = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$	$V_0 = \frac{V_m}{\pi} \cos \alpha$

7. Что подразумевается под режимом непрерывного тока тиристорного преобразователя?

*Ответ.* Непрерывный ток означает, что ток нагрузки всегда больше нулевого значения. Прерывание тока при этом отсутствует. Если индуктивность нагрузки достаточно большая, протекание тока становится непрерывным.

8. Двойной преобразователь — это четырехквadrантный преобразователь. Так это или нет?

*Ответ.* Да.

9. Каково назначение демпфирующего днода в коммутаторе постоянного тока?

*Ответ.* Демпфирующий днод предназначен для устранения выбросов высокого напряжения на тиристоре в момент его выключения.

10. Что подразумевается под термином «рабочий цикл коммутатора постоянного тока»?

*Ответ.* Отношение времени включенного состояния коммутатора к времени полного периода преобразования называется скважностью  $\delta$ .

$$\delta = \frac{T_{\text{он}}}{T_{\text{он}} + T_{\text{оф}}};$$

$$T_{\text{он}} + T_{\text{оф}} = T;$$

$$V_0 = \alpha V_s$$

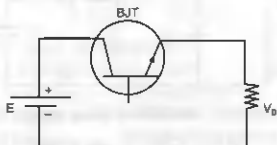
$V_s$  — напряжение питания коммутатора постоянного тока;

$V_0$  — выходное напряжение коммутатора постоянного тока.

Выходное напряжение коммутатора можно изменять за счет регулирования скважности  $\delta$ .

11. Нарисуйте схему транзисторного коммутатора постоянного тока.

Ответ



12. По какой формуле вычисляется входной коэффициент мощности однофазного контроллера переменного напряжения с резистивной нагрузкой?

Ответ. Коэффициент мощности определяется как:

$$\lambda = \frac{V_r I}{V I} = \frac{V_r}{V} = \frac{1}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)^{1/2},$$

где  $\alpha$  — угол включения тиристоров

13. Какова разница между релейным управлением и фазовым управлением в регуляторе переменного напряжения?

Ответ. В случае релейного управления нагрузка через тиристорный коммутатор периодически подключается к источнику переменного напряжения на время одного или нескольких периодов входного напряжения. В случае фазового управления нагрузка подсоединяется через тиристорный коммутатор к источнику переменного напряжения на время доли периода входного напряжения.

14. Нарисуйте схему трехфазного однополупериодного регулятора напряжения переменного тока.

15. Почему использование тиристоров нежелательно в инверторах и коммутаторах?

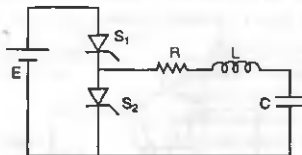
Ответ. В инверторах, работающих на высоких частотах, необходимо использовать быстродействующие ключи. Тиристорные ключи способны эффективно работать на частотах до 2 кГц. Для управления тиристорами необходимы дополнительные цепи принудительной коммутации.

16. Как регулируется частота выходного напряжения инвертора?

Ответ. Частота выходного напряжения регулируется посредством изменения коммутирующей частоты.

17. Нарисуйте схему последовательного инвертора.

*Ответ*



18. Объясните причину использования микропроцессоров для генерации коммутирующих импульсов.

*Ответ.* Микропроцессоры обладают высокой универсальностью, они способны также проводить самодиагностику неисправностей.

19. Каковы преимущества бесконтактных коммутаторов по сравнению с общеприимными?

*Ответ.* При использовании бесконтактного коммутатора отсутствует механизм возникновения дугового разряда.

20. Для чего применяются источники бесперебойного питания?

*Ответ.* Для питания критических нагрузок, например компьютерных сетей, систем управления, медицинского оборудования.

21. В чем отличие тиристора от симистора?

*Ответ.* Тиристор может находиться в состоянии проводимости только в одном направлении, а симистор — в двух направлениях. Для включения тиристора на управляющий электрод подается положительное напряжение. Для включения симистора может быть использован запускающий импульс любой полярности.

22. Каковы преимущества мощного МОП-транзистора по сравнению с мощным биполярным транзистором?

*Ответ.* Мощный МОП-транзистор обладает более высокой скоростью переключения по сравнению с мощным биполярным транзистором. В мощном МОП-транзисторе отсутствует эффект вторичного пробоя. Мощный МОП-транзистор обладает высоким входным импедансом.

23. Назовите единицу измерения параметра  $dv/dt$  тиристорov.

*Ответ.* Вольт на микросекунду.

24. Каково основное различие между однополупериодными и двухполупериодными выпрямительными схемами?

*Ответ.* В однополупериодной цепи ток через нагрузку протекает в течение одного полупериода, а в двухполупериодном выпрямителе ток нагрузки протекает в течение двух полупериодов.

25. Каким выражением определяется среднее напряжение на нагрузке однофазного однополупериодного управляемого тиристорного мостового выпрямителя?

*Ответ.* Среднее выходное напряжение определяется как:

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha).$$

26. Что такое «двойной преобразователь»?

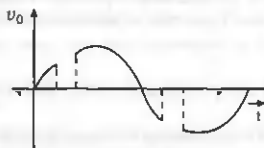
*Ответ.* Двойной преобразователь состоит из двух двухполупериодных управляемых преобразователей, соединенных вместе. Один из них выполняет функции выпрямителя с углом управления  $\alpha < 90^\circ$ , а другой выполняет функции инвертора с углом управления  $\alpha > 90^\circ$ .

27. Каково влияние индуктивности нагрузки на форму тока нагрузки в коммутаторе постоянного тока?

*Ответ.* Если индуктивность нагрузки высока, ток нагрузки становится непрерывным.

28. Нарисуйте типичную форму напряжения на нагрузке однофазного регулятора переменного напряжения с индуктивной нагрузкой.

*Ответ*



29. Объясните необходимость использования диодов обратного тока в инверторе.

*Ответ.* Если нагрузка инвертора имеет большую индуктивность, в момент выключения тиристора на нем появляется высокое обратное напряжение. Это напряжение может вывести из строя тиристор. Диоды обратного тока подсоединены к каждому тиристорному антипараллельно. Через эти диоды реактивная мощность, запасенная в нагрузке, возвращается обратно в источник питания.

30. Где на практике применяются последовательные инверторы?

*Ответ*

1. В системах регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока.
2. В устройствах индукционного нагрева.
3. В устройствах аварийного электроснабжения.
4. В источниках бесперебойного питания.

**31.** Назовите преимущества инверторов тока по сравнению с инверторами напряжения.

*Ответ*

1. Цепь коммутирования упрощена, так как в этом случае необходимы только конденсаторы.
2. Замедленное реагирование на изменения нагрузки.
3. Не требуются диоды обратного тока.
4. Очень эффективное использование тиристорov.
5. Возможна саморегенерация.

**32.** Что определяет величину управляющего импульса в мощном транзисторе?

*Ответ.* Ток нагрузки определяет величину управляющего импульса в мощном транзисторе.

**33.** Для передачи большой мощности на большие расстояния предпочтительны системы передачи высокого постоянного напряжения. Да или нет?

*Ответ.* Да.

**34.** Чем отличается запираемый тиристор от обычного?

*Ответ.* Запираемый тиристор можно выключить подачей отрицательного напряжения на управляющий электрод по отношению к его катоду.

**35.** Симистор — коммутатор постоянного тока. Да или нет?

*Ответ.* Нет.

**36.** Мощный МОП-транзистор — управляемый напряжением прибор. Да или нет?

*Ответ.* Да.

**37.** Объясните необходимость параллельной работы тиристорov.

*Ответ.* В случае необходимости увеличения рабочего тока применяется параллельное соединение тиристорov.

**38.** Двухполупериодный тиристорный преобразователь может работать только как выпрямитель. Да или нет?

*Ответ.* Нет.

**39.** По какой формуле вычисляется входной коэффициент мощности однофазного двухполупериодного тиристорного мостового преобразователя?

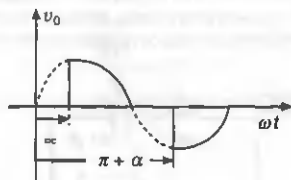
*Ответ.* Коэффициент мощности  $\lambda = (2\sqrt{2}/\pi) \cos \alpha$ .

**40.** Двойной преобразователь состоит из двух преобразователей, соединенных последовательно. Да или нет?

*Ответ.* Нет.

41. Нарисуйте типичную форму выходного напряжения однофазного преобразователя переменного напряжения с активной нагрузкой.

*Ответ*



В случае активной нагрузки напряжение и ток сфазированы.

42. Тиристоры нежелательны, если входной ток постоянный. Да или нет?

*Ответ.* Да.

43. Как изменить среднее выходное напряжение инвертора с прямоугольным выходным напряжением?

*Ответ.* За счет использования широтно-импульсной модуляции.

44. В параллельном инверторе емкость используется для коммутации. Да или нет?

*Ответ.* Да.

45. Зачем необходима изоляция между сетью электропитания и схемой управления?

*Ответ.* Для разделения низковольтной схемы управления и цепей управления тиристором, находящихся под высоким напряжением.

46. Что представляет собой высоковольтная система электропередачи на постоянном токе?

*Ответ.* В высоковольтной системе электропередачи на постоянном токе в начале процесса передачи генерируется мощность переменного тока, которая преобразуется в постоянный ток выпрямителем. Таким же образом после передачи мощности постоянное напряжение преобразуется в переменное инвертором.

47. Источники бесперебойного питания обычно используются для критических нагрузок. Да или нет?

*Ответ.* Да.

48. Каковы недостатки бесконтактных коммутаторов по сравнению с общепринятыми?

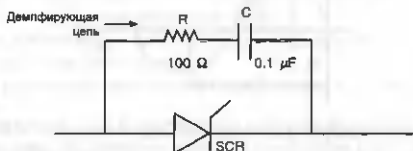
*Ответ.* Бесконтактные коммутаторы не могут использоваться при очень больших токах из-за низкой перегрузочной способности тиристором.

49. Каково основное отличие тиристора от запираемого тиристора?

*Ответ.* Тиристор нельзя выключить подачей отрицательного напряжения на управляющий электрод в отличие от запираемого тиристора.

50. Нарисуйте демпфирующую цепь, используемую для предохранения тиристора от избыточной скорости нарастания напряжения  $dv/dt$ .

*Ответ*

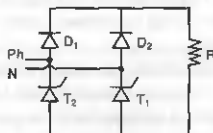


51. Почему биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) популярен в настоящее время?

*Ответ.* Биполярный транзистор с изолированным затвором является прибором, работающим на неосновных носителях, и обладает меньшей проводимостью во включенном состоянии по сравнению с МОП-транзистором. В то же время он легко управляется, имеет широкую область безопасной работы, обладает устойчивостью к пиковым токовым нагрузкам. Однако скорость переключения биполярного транзистора с изолированным затвором ниже, чем у МОП-транзистора.

52. Нарисуйте схему однофазного мостового выпрямителя с резистивной нагрузкой.

*Ответ*



$$V_0 = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

53. Двухполупериодные тиристорные преобразователи являются двухквadrантными преобразователями. Да или нет?

*Ответ.* Да.

54. Каков входной коэффициент мощности двухполупериодного тиристорного преобразователя при значении угла  $\alpha = 90^\circ$ , учитывая отсутствие колебаний тока нагрузки?



Ответ

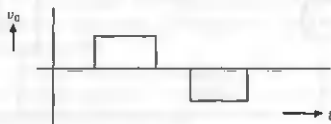
$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha ;$$

Если  $\alpha = 90^\circ$ :

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos 90^\circ, \lambda = 0.$$

55. Нарисуйте типичную форму напряжения на нагрузке инвертора.

Ответ



Форма выходного напряжения может быть прямоугольной или квазипрямоугольной.

56. Какова разница между диодами обратного тока и демпфирующими диодами?

Ответ

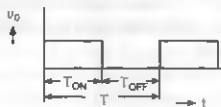
Демпфирующий диод	Диод обратного тока
Используется один диод	Используются несколько диодов
Подсоединен параллельно нагрузке	Подсоединен встречно к каждому тиристор
Обеспечивает непрерывность тока в нагрузке	Возвращает реактивную мощность обратно в источник

57. Что такое «частотный преобразователь»?

Ответ. Это схема, повышающая или понижающая частоту без изменения напряжения, работающая по принципу одноступенчатого преобразования.

58. Нарисуйте форму выходного тока коммутатора постоянного тока.

Ответ

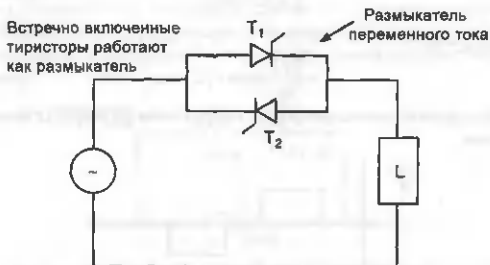


59. Какова форма управляющего импульса биполярного транзистора с изолированным затвором?

Ответ. Форма импульса — прямоугольное напряжение.

60. Нарисуйте схему однофазного бесконтактного размыкателя.

Ответ



## Часть 2. Выпрямители

1. В однофазных преобразователях величина пикового обратного напряжения тиристора должна быть больше в случае ...

Ответ. ...использования трансформатора с центральным отводом.

2. Оптимальный управляющий сигнал для тиристора...

Ответ. ...высокочастотная последовательность импульсов.

3. Что называется режимом работы преобразователя с перекрытием?

Ответ. В однофазных двухполупериодных мостовых преобразователях, четыре тиристора одновременно находятся в проводящем состоянии. В преобразователях с центральным отводом от обмотки трансформатора два тиристора одновременно находятся в проводящем состоянии. В двухполупериодных трехфазных преобразователях, три тиристора одновременно находятся в проводящем состоянии. В течение периода перекрытия выходное напряжение равно нулю. Перекрытие возникает вследствие присутствия в схеме реактивных элементов.

4. Однофазный мостовой выпрямитель может работать без изолирующего трансформатора.

Ответ. Да.

5. Для чего необходимо применять импульсный трансформатор для запуска тиристора?

Ответ. Для обеспечения изоляции между сетью электропитания и схемой управления.

6. Объясните принцип работы схемы усилителя импульсов, используемых для запуска тиристорного ключа.

*Ответ.* Амплитуда импульсов, генерируемых схемой управления, недостаточна для включения тиристора. Транзистор, включенный на выходе схемы управления, усиливает ток управления до заданного значения.

7. Каков должен быть диапазон углов управления  $\alpha$  двухполупериодным преобразователем в режиме регенерации? Нагрузка какого типа необходима для осуществления режима регенерации?

*Ответ.* Угол управления  $\alpha$  должен находиться между  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Для осуществления режима регенерации нагрузкой должен быть электродвигатель постоянного тока.

8. В каких схемах необходим демпфирующий диод?

*Ответ.* Демпфирующий диод необходим в схемах преобразователей с индуктивно-резистивной нагрузкой.

9. Какова разница между симметричными и асимметричными схемами мостового управляемого выпрямителя?

*Ответ.* В симметричном мостовом управляемом выпрямителе каждая фаза содержит один тиристор и один диод. В асимметричном мостовом управляемом выпрямителе, одна фаза содержит два тиристора, а другая фаза содержит два диода.

## Преобразователи постоянного напряжения в постоянное

1. Преобразователь постоянного напряжения в постоянное может быть...

*Ответ.* ...повышающим и понижающим.

2. Преобразователь типа А...

*Ответ.* ...всегда требует принудительной коммутации.

3. Периоды времени между смежными импульсами схемы управления регулируются исходя из...

*Ответ.* ...коэффициента заполнения.

4. Как классифицируются способы принудительной коммутации?

*Ответ.* Класс А, класс В, класс С, класс D и класс E.

5. Опишите процесс коммутирования тиристорного ключа напряжением.

*Ответ.* При коммутировании напряжением предварительно заряженный конденсатор создает обратное напряжение на тиристоре и выключает его.

6. Что представляет собой непрерывный и прерывающийся ток нагрузки в преобразователе типа А?

*Ответ.* Если индуктивность нагрузки высокая и время выключенного состояния мало, ток нагрузки непрерывен. Если индуктивность нагрузки мала и время выключенного состояния большое, электрический ток нагрузки падает до нулевого значения в течение времени выключенного состояния.

7. Что представляет собой широтно-импульсная модуляция выходного напряжения преобразователя?

*Ответ.* При широтно-импульсной модуляции рабочая частота остается постоянной, а выходное напряжение регулируется за счет изменения времени включения и выключения.

8. Для формирования сигнала управления тиристором таймер 555 используется в...

*Ответ.* ...режиме одновибратора.

## Инверторы

1. Какова разница между инвертором напряжения и инвертором тока?

*Ответ*

Инвертор напряжения	Инвертор тока
1. Использует источник напряжения	1. Использует источник тока
2. Использует коммутацию током.	2. Использует коммутацию напряжением
3. Используются 4 тиристора в каждом плече	3. Используются 2 тиристора в каждом плече
4. Диоды подключены параллельно тиристорам	4. Диоды подключены последовательно тиристорам
5. Может работать в режимах управления $120^\circ$ или $180^\circ$	5. Может работать только в режиме управления $120^\circ$
6. Выходное напряжение инвертора квазипрямоугольное	6. Выходной ток инвертора квазипрямоугольный

2. В качестве источника управляющих импульсов последовательного инвертора используется делитель частоты с противофазными выходными сигналами для...

*Ответ.* ...предотвращения одновременного запуска тириستоров.

## 3. Каковы недостатки последовательного инвертора?

*Ответ*

- 1) Невозможность использования на низких частотах.
- 2) Выходная частота инвертора должна быть меньше, чем его резонансная частота.
- 3) Вследствие наличия мертвой зоны невозможно получить чистое выходное синусоидальное напряжение.

## 4. Как определяется коэффициент нелинейных искажений?

*Ответ.* Коэффициент нелинейных искажений — это отношение гармонических составляющих выходного напряжения к его основной частоте.

## 5. Запас времени для последовательного инвертора гарантирует...

*Ответ.* ...безопасность работы приборов.

## 6. Какова разница между коммутированием напряжением и коммутированием током?

*Ответ*

Коммутирование напряжением	Коммутирование током
Тиристор выключается предварительно заряженным конденсатором до определенного напряжения Напряжение заряженного конденсатора создает обратное смещение на тиристоре	Тиристор выключается током колебательного LC-контура Ток колебательного LC-контура прикладывается к диоду, параллельно включенному к тиристору в обратном направлении

## 7. Для чего используется широтно-импульсный модулятор в инверторе?

*Ответ.* Для регулирования выходного напряжения инвертора за счет изменения средней длительности управления.

## Дополнительные вопросы

## 1. Почему в импульсных источниках питания используется высокая рабочая частота?

*Ответ.* Для уменьшения габаритов и веса фильтра и трансформатора.

## 2. Индукционный нагрев применяется для...

*Ответ.* ...нагрева металлов.

3. Для индукционного нагрева используется последовательный инвертор,...

*Ответ.* ...работающий на высокой частоте.

4. Высоковольтная линия передачи постоянного напряжения экономична...

*Ответ.* ... для передачи мощности на расстояния более чем 800 км.

5. Зачем в высоковольтных преобразователях используются последовательно соединенные тиристоры?

*Ответ.* Для увеличения рабочего напряжения.

6. Двойные преобразователи, работающие с циркулирующим током, обладают...

*Ответ.* ...высоким быстродействием.

7. Каковы основные узлы источника бесперебойного питания?

*Ответ.* Выпрямитель, инвертор и батарея.

8. Схема регенерации мощности скольжения используется для...

*Ответ.* ...управления асинхронным электродвигателем.

9. Регенеративное торможение электродвигателя постоянного тока обеспечивается...

*Ответ.* ...фазоуправляемым двухполупериодным преобразователем.

10. Может ли конденсатор, коммутируемый тиристором обеспечить непрерывную регулировку коэффициента мощности для различных нагрузок?

*Ответ.* Нет.

## Литература

- Bose B. K. Power Electronics and A. C. Drives. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1986.
- Sen P. C. Thyristorised D. C Drivers. N. Y.; Wiley Interscience, 1981.
- Lander C. W. Power Electronics. L.; McGraw-Hill Book company, 1993.
- Bimbhra P. S. Power Electronics. Delhi; Khanna Publishers. 1991.
- Rama Reddy S. Investigations on quasi-resonant converter fed DC drives, Ph. D thesis. Anna University. 1995.
- Subrahmanyam V. Thyristor control of electric drives. Tata McGraw-Hill, New Delhi. 1988.
- Dubey G. K., Doradla S. R., Joshi A. and Sinha R. M. K. Thyristorised Power Controllers. New Delhi: Wiley Eastern. 1987.
- Ilango B. Power Electronics, Lecture notes. Anna University, Chennai. 1985.
- Rama Reddy S. Applied Electronics Laboratory Manual, Madras University, Chennai. 1998.
- Rama Reddy S. Power Electronics Lecture notes. Madras University, Chennai. 1998.
- Bhawaneswari G. Power Electronic Instrumentation, Lecture notes. Anna University, Chennai. 1995.
- Rama Reddy S. Short questions and answers in power electronics, Madras University. 1999.

Заявки на книги присылайте по адресу:

125319 Москва, а/я 594

Издательство «Техносфера»

e-mail: [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru)

[sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)

факс: (095) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте  
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте

<http://www.technosphere.ru>

**С. Рама Редди**

**Основы силовой электроники**

Компьютерная верстка – А.Н. Свирин

Корректор – О.Ч. Кохановская

Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев

Ответственный за выпуск – Л.Ф. Соловйчик

---

Формат 60х90/16. Печать офсетная.

Гарнитура Ньютон.

Печ. л. 18, Тираж 3000 экз. Зак. № 1965.

Бумага офсет № 1, плотность 65 г/м<sup>2</sup>.

---

Издательство «Техносфера»

Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

---

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография № 1»,

428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15



# ЗОЛОТОЙ ШАР

представляет

## СИЛОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ

International  
**IGBT** Rectifier

**SEMIKRON**

**ADVANCED  
POWER  
TECHNOLOGY**

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ОФИС  
Москва  
Лубянский пр.-д. 27-1  
Тел.: (095) 234-0111  
Факс: (095) 956-3348  
E-mail: sales@zolshar.ru  
http://www.zolshar.ru

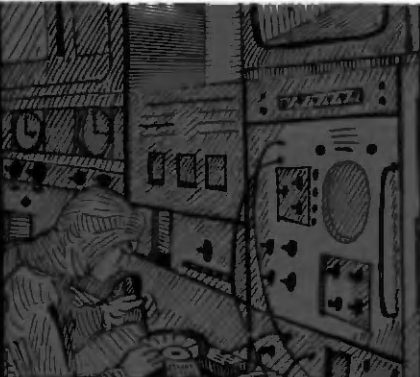
[www.zolshar.ru](http://www.zolshar.ru)

мир

электроники

С. РАМА РЕДДИ

Основы  
силовой  
электроники

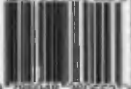


СХЕМЫ  
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРИМЕНЕНИЙ

КНИГА  
ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ-ПРАКТИКОВ



ISBN 5-94836-055-5



9 780948 360553



ТЕХНОСФЕРА