

# Электроники

С. РАМА РЕДДИ

Основы  
силовой  
электроники



ТЕХНОСФЕРА



# **М И Р** **электроники**

**С. РАМА РЕДДИ**

## **ОСНОВЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

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

**ТЕХНОСФЕРА**  
Москва  
2006

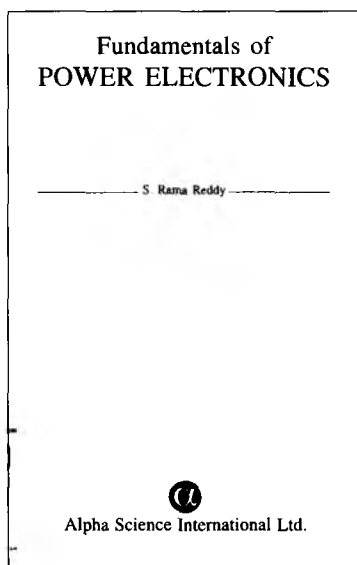
**С. Рама Редди**

**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.



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 1-84265-056-4 (англ)**

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	13
<b>Глава 1. Полупроводниковые приборы</b> .....	14
1.1. Введение .....	14
1.1.1. Собственный полупроводник.....	12
1.1.2. Примесный полупроводник .....	15
1.1.3. <i>p-n</i> -переход .....	18
1.2. <i>p-n</i> -диод .....	19
1.3. Биполярный транзистор .....	21
1.4. Тиристор.....	23
1.4.1. Двухтранзисторный аналог тиристора .....	25
1.4.2. Обратно 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 тириستоров .....	33
1.4.8. Способы включения тиристоров .....	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
<b>Глава 2. Схемы управления тиристорами</b> .....	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
<b>Глава 3. Переключающие схемы</b> .....	54
3.1. Введение .....	54
3.2. Переключение .....	54
3.3. Последовательная <i>LC</i> -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

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>	<b>65</b>
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>	<b>106</b>
5.1. Введение .....	106
5.2. Общие положения.....	106
5.3. Способы управления коммутаторами.....	108
5.4. Классификация коммутаторов.....	109

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>	<b>131</b>
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 <i>RLC</i> -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>	<b>160</b>
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

<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 протиковключением .....	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 протиковключением .....	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>	<b>228</b>
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>	<b>243</b>
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 входных 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