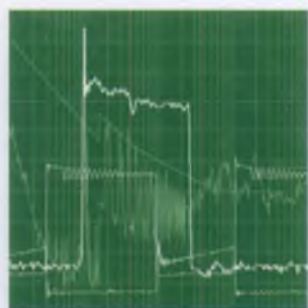


621.382.5
М 473
523728

Электроники

В. МЕЛЕШИН

Транзисторная
преобразовательная
техника



ТЕХНОСФЕРА



М И Р **Электроники**

В. МЕЛЕШИН

**Транзисторная
преобразовательная
техника**

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2006

В.И. Мелешин

Транзисторная преобразовательная техника

Москва:

Техносфера, 2006. - 632 с. ISBN 5-94836-051-2

В монографии изложены принципы преобразований электрической энергии, выполняемых импульсными транзисторными устройствами, и используемые при этом технические решения.

В книге учтены последние достижения в данной области техники, позволяющие создавать устройства и системы высокой надежности, малого объема, рассеивающие минимальную мощность и создающие благоприятные условия работы первичной сети.

Книга будет полезна студентам, изучающим силовую электронику, аспирантам и специалистам, изучающим и разрабатывающим устройства и системы преобразовательной техники.

© 2005, В.И. Мелешин
© 2006, ЗАО "РИЦ "Техносфера",
оригинал-макет, оформление.

ISBN 5-94836-051-2

Содержание

Предисловие	16
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	17
1.1. Транзисторная преобразовательная техника как научно-техническое направление современной электроники	17
1.2. О книге «Транзисторная преобразовательная техника»	17

ЧАСТЬ I КОМПОНЕНТЫ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ	22
2.1. Неуправляемые диоды	22
2.1.1. Диоды с <i>p-n</i> -переходом	22
2.1.2. <i>pin</i> -диоды	25
2.1.3. Мощные диоды Шоттки	31
2.2. Биполярные транзисторы	37
2.2.1. Маломощные (сигнальные) транзисторы	37
2.2.2. Мощные биполярные транзисторы	39
2.3. Мощные полевые транзисторы	43
2.3.1. Маломощные полевые транзисторы с изолированным затвором	44
2.3.2. Мощный полевой транзистор	46
2.4. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)	49
ГЛАВА 3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СЕРДЕЧНИКИ	51
3.1. Общие свойства магнитных материалов	51
3.1.1. Гистерезис	51
3.1.2. Магнитная проницаемость	53
3.1.3. Сопrotивление магнитному потоку	55
3.1.4. Магнитодвижущая сила и напряженность магнитного поля	57
3.2. Выбор магнитных материалов	58
3.2.1. Влияние воздушного зазора в сердечнике	58
3.3. Аморфное железо и сплавы на основе кобальта	61
3.3.1. Аморфное железо	61
3.3.2. Кобальтовые сплавы	66

3.4. Ленточные разрезные сердечники из электротехнической стали и никелевых сплавов	68
3.5. Ферриты	70
3.6. Порошковые материалы	71
3.6.1. Порошковое распыленное железо	71
3.6.2. Мо-пермаллой	73
3.6.3. Порошковый материал на основе сплава железа и никеля	74
3.6.4. Железо-алюминиевый порошковый материал (Kool M μ)	74
ГЛАВА 4. ДРОССЕЛИ	76
4.1. Сглаживающие дроссели	76
4.2. Дроссели переменного тока	85
ГЛАВА 5. ТРАНСФОРМАТОРЫ	90
5.1. Идеальный трансформатор	90
5.2. Индуктивность намагничивания трансформатора	92
5.3. Индуктивность рассеяния	93
5.4. Основные соотношения для двухобмоточного трансформатора в общем случае	95
5.5. Трансформаторы с несколькими обмотками	97
5.6. Основные соотношения для расчета силовых трансформаторов преобразователей	103
5.6.1. Расчетные соотношения для мощностей трансформатора	103
5.6.2. Связь произведения $ScSo$ с мощностью P_T трансформатора	105
5.7. Методика расчета трансформатора	106
ГЛАВА 6. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОБМОТКАХ ДРОССЕЛЕЙ И ТРАНСФОРМАТОРОВ. ПЛАНАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ	112
6.1. Потери в обмотках трансформаторов и дросселей на высокой частоте	112
6.1.1. Скин-эффект в проводнике	112
6.2. Трансформаторы и дроссели с плоскими обмотками	121
ГЛАВА 7. КОНДЕНСАТОРЫ С БОЛЬШИМ ЗАРЯДОМ И ЭНЕРГИЕЙ	127
7.1. Алюминиевые электролитические конденсаторы	127
7.1.1. Конструкция	127
7.1.2. Танталовые конденсаторы	135
7.2. Пленочные конденсаторы. Классификация пленочных конденсаторов	138
7.3. Керамические конденсаторы	140
7.3.1. Диэлектрик керамического конденсатора	141
ГЛАВА 8. ВАРИСТОРЫ И ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДНИКИ	146
8.1. Варисторы	146
8.1.1. Вольтамперные характеристики	147
8.1.2. Параметры варисторов	148
8.2. Газовые разрядники	151

ЧАСТЬ II

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И БЫСТРЫЕ
ПРОЦЕССЫ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

ГЛАВА 9. КРАТКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	154
9.1. Функции, выполняемые силовой частью, ее принципиальные особенности	154
9.2. Классификация преобразователей энергии	155
9.3. Коэффициент мощности, коэффициент гармоник, коэффициент пульсаций	157
9.3.1. Коэффициент мощности	157
9.3.2. Коэффициент гармоник	159
9.3.3. Коэффициент пульсаций	161
9.4. Выпрямители	161
9.4.1. Однофазная однополупериодная схема выпрямления	162
9.4.2. Схема ООВ при индуктивном характере нагрузки	164
9.4.3. Схема ООВ при индуктивном характере нагрузки и включении в нее закрывающего диода	166
9.4.4. Коммутационные процессы	168
9.4.5. Выходная характеристика	170
9.5. DC-DC преобразователи	171
9.6. DC-AC преобразователи	176
9.7. AC-DC преобразователи	179
9.8. AC-AC преобразователи	181
9.9. Зарядные устройства	183
9.9.1. Заряд емкостного накопителя	183
9.9.2. Заряд аккумуляторной батареи	187
9.10. Преобразователи с передачей энергии в сеть	187
ГЛАВА 10. ВЫПРЯМИТЕЛИ НА НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ДИОДАХ И СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ	190
10.1. Основные схемы выпрямления	190
10.2. Расчетные соотношения для схем выпрямления при активной нагрузке	193
10.3. Сглаживающие фильтры	197
10.4. Работа выпрямителя на индуктивный фильтр	198
10.5. Работа выпрямителя на активно-емкостный фильтр	199
10.5.1. Работа выпрямителя на противо-ЭДС	200
10.5.2. Работа выпрямителя на RC-фильтр	202
10.6. Особенности работы выпрямителя на емкостный фильтр	203
10.7. Работа выпрямителя на индуктивно-емкостный фильтр	208
10.8. Сглаживающие фильтры—умножители напряжения и удвоитель тока	212

10.8.1. Умножители напряжения	212
10.8.2. Однофазная мостовая схема удвоения напряжения	213
10.8.3. Удвоитель тока	214
10.9. Резонансные и магнитно-связанные сглаживающие фильтры	214
10.9.1. Одно- и двухзвенный LC-фильтры	214
10.9.2. Резонансные фильтры	216
10.9.3. Магнитно-связанные фильтры	220

ГЛАВА 11. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ (DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БЕЗ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ВХОДА И ВЫХОДА)

11.1. Законы Кирхгофа для средних значений переменных	225
11.2. Базовая переключающая модель для построения ИРН	227
11.3. Понижающий импульсный регулятор напряжения (ИРН-1)	229
11.4. Повышающий импульсный регулятор напряжения (ИРН-2)	234
11.5. Инвертирующий импульсный регулятор напряжения (ИРН-3)	237
11.6. Сравнение понижающего и повышающего регуляторов с инвертирующим	240
11.7. Оценка потерь в импульсных регуляторах напряжения	243
11.7.1. Потери и КПД ИРН-1	244
11.7.2. Потери и КПД ИРН-2	245
11.8. Режим прерывистого тока в импульсных регуляторах напряжения	246
11.9. Импульсные регуляторы напряжения с разделительным конденсатором ...	249
11.9.1. ИРН с низким уровнем пульсаций на входе и выходе	249
11.9.2. ИРН с разделительным конденсатором и непрерывным потреблением входного тока	252
11.9.3. ИРН с непрерывной передачей тока в нагрузку, блокированную конденсатором	254
11.10. Комбинированные ИРН	255

ГЛАВА 12. DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ВХОДА И ВЫХОДА

12.1. Однотактный прямоходовой преобразователь	259
12.1.1. Принципиальная особенность работы однотактного прямоходового преобразователя	259
12.1.2. Расчетные соотношения в ОПП	264
12.1.3. Влияние индуктивности рассеяния	267
12.1.4. Однотактный прямоходовой преобразователь с активным ограничением напряжения	269
12.2. Двухтактные DC-DC преобразователи — аналоги понижающего импульсного регулятора напряжения	270
12.2.1. Преобразователь со средней точкой первичной обмотки трансформатора ...	270
12.2.2. Полумостовой преобразователь	274
12.2.3. Мостовой преобразователь	278
12.3. DC-DC преобразователь с дросселем на входе — аналог повышающего импульсного регулятора напряжения	280
12.4. DC-DC обратногоходовой преобразователь	283
12.4.1. Влияние индуктивности рассеяния трансформатора	285

12.4.2. Однотактный обратногоходовой преобразователь с активным ограничением напряжения	286
12.5. Преобразователи на основе импульсных регуляторов с разделительным конденсатором	287
ГЛАВА 13. РЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	289
13.1. Последовательный резонансный преобразователь	290
13.1.1. Управление напряжением на нагрузке	290
13.2. Параллельный резонансный преобразователь	293
13.3. DC-DC преобразователи с последовательным подключением нагрузки к резонансному контуру	294
13.4. DC-DC преобразователи с подключением нагрузки к конденсатору резонансного контура	302
13.4.1. Анализ двух- и трехинтервального режимов	303
13.5. Однотактный резонансный преобразователь	312
ГЛАВА 14. DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С МЯГКИМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ	316
14.1. Потери на включение, влияние выходной емкости ключа	316
14.2. Несимметричные преобразователи с мягким переключением	318
14.2.1. Преобразователь с активным клапном	318
14.2.2. Несимметричный полумостовой преобразователь	327
14.2.3. Сравнение несимметричных схем с мягким переключением	335
14.2.4. Емкостный фильтр в несимметричных преобразователях с мягким переключением	336
14.3. Мостовой преобразователь с фазовым управлением	339
14.3.1. Процессы переключения в преобразователе с фазовым управлением	342
14.4. Двухтрансформаторные DC-DC преобразователи с мягким переключением	344
14.4.1. Двухтрансформаторные несимметричные преобразователи	345
14.4.2. Двухтрансформаторный несимметричный полумостовой преобразователь с неравными коэффициентами трансформации	354
14.4.3. Двухтрансформаторный мостовой преобразователь с фазовым управлением	357
14.5. DC-DC преобразователи с удвоителем тока	362
14.5.1. Несимметричный полумостовой преобразователь с удвоителем тока	362
14.5.2. Мостовой преобразователь с удвоителем тока и фазовым управлением	367
14.6. Преобразователи с интегрированным магнитным элементом	371
14.7. Индуктивность рассеяния, ее влияние на работу преобразователя	373
ГЛАВА 15. ИНВЕРТОРЫ (DC-AC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ)	374
15.1. Основной вариант построения инвертора	374
15.2. Инвертор тока	376
15.3. Формирование выходного напряжения и тока	377
15.3.1. Широтно-импульсная модуляция	379
15.3.2. Выходные каскады инверторов при широтно-импульсной модуляции	383
15.3.3. Амплитудно-импульсная модуляция	387
15.4. Трехфазные инверторы	390

ЧАСТЬ III

УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВАМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

ГЛАВА 16. ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КАК СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	398
16.1. Методы управления выходными параметрами преобразователей	398
16.2. Общие требования, предъявляемые к преобразователям как устройствам автоматического управления	400
ГЛАВА 17. НЕПРЕРЫВНЫЕ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	403
17.1. Методика перехода к непрерывной модели для общего случая	403
17.1.1. Переход к непрерывной модели	403
17.1.2. Линеаризация непрерывной модели СЧ преобразователя	405
17.2. Передаточные матричные функции и передаточные функции непрерывной линейной модели преобразователя как звена САУ	410
17.3. Уравнение управления в непрерывной линейной модели преобразователя	417
17.4. Устойчивость непрерывной линейной модели преобразователя	422
17.5. Управление по выходному напряжению и току в преобразователях	427
17.5.1. Управление по максимальному току	427
17.6. Передаточные функции разомкнутых контуров при управлении по выходному напряжению и максимальному току	430
ГЛАВА 18. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	432
18.1. Устойчивость понижающего импульсного регулятора напряжения	432
18.2. Приближенный матричный способ оценки устойчивости	440
ГЛАВА 19. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	446
19.1. Моделирование на основе передаточных функций	446
19.1.1. Передаточные функции разомкнутых систем	446
19.1.2. Передаточные функции замкнутых систем, расчет переходных процессов ...	452
19.2. Цифровое моделирование	457
19.2.1. Непрерывная линейная модель на основе повышающего регулятора при управлении по выходному напряжению	457
19.2.2. Непрерывная линейная модель преобразователя на основе повышающего регулятора при управлении по выходному напряжению и току	460

ЧАСТЬ IV

УЗЛЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ

ГЛАВА 20. УПРАВЛЕНИЕ МОЩНЫМИ ПОЛЕВЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ	466
20.1. Требования к управлению затвором	466
20.2. Управление MOSFET при гальванической связи его затвора с источником сигнала	468

20.3. Трансформаторное управление	470
20.4. Параллельное включение MOSFET	473
ГЛАВА 21. ДРАЙВЕРЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ	474
21.1. Быстродействующие драйверы, управляющие MOSFET	474
21.2. Одноканальный драйвер с защитой по току управляемого ключа	476
21.3. Драйверы IGBT с расширенными функциональными возможностями	478
21.4. Драйверы, управляющие стойкой транзисторов	482
ГЛАВА 22. КОНТРОЛЛЕРЫ УПРАВЛЕНИЯ	484
22.1. Контроллеры управления корректорами коэффициента мощности	484
22.1.1. Повышающий импульсный регулятор как основа ККМ	484
22.1.2. Контроллер ККМ	489
22.2. Контроллеры управления DC-DC преобразователями	494
22.3. Контроллеры управления мостовыми каскадами методом фазового сдвига	497
ГЛАВА 23. ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	504
23.1. Источники опорного напряжения на стабилитронах	504
23.2. Регулируемые источники опорного напряжения высокой точности	506
23.2.1. Формирование участка постоянной мощности в DC-DC преобразователях с применением микросхемы РИОН	510
23.3. Источники опорного напряжения высокой точности	516
ГЛАВА 24. ДЕМПФИРУЮЩИЕ ЦЕПИ	519
24.1. Демпфирующие цепи, подключаемые к транзисторам	519
24.1.1. Процесс включения транзистора	520
24.1.2. Процесс выключения транзистора	524
24.1.3. Демпфирующая цепь без потерь мощности	526
24.2. Демпфирующие цепи, подключаемые к диодам	530
24.2.1. Резистивно-емкостные демпфирующие цепи	531
24.2.2. Насыщающиеся дроссели в качестве ограничителей выбросов напряжения на диодах	532
ГЛАВА 25. ЗВЕНЬЯ КОРРЕКЦИИ	536
25.1. Пассивные звенья коррекции	536
25.2. Звенья коррекции с использованием операционных усилителей	539
ГЛАВА 26. ПОДАВЛЕНИЕ РАДИОПОМЕХ	545
26.1. Составляющие кондуктивных радиопомех	545
26.2. Нормирование радиопомех	547
26.3. Измерение радиопомех	548
26.4. Прохождение симметричной и несимметричной составляющих радиопомех от преобразователя к ИРП	551
26.5. Методы подавления радиопомех, создаваемых преобразователями	553
26.5.1. Фильтры защиты от радиопомех	553
26.5.2. Экранирование	558

ГЛАВА 27. ОТВОД ТЕПЛА	561
27.1. Способы передачи тепла	561
27.2. Аналогия с электрическими цепями	562
27.3. Теплопроводность	563
27.4. Конвекция	566
27.5. Удельная мощность преобразователя, ее зависимость от КПД	567
27.6. Переходные тепловые режимы	569

ЧАСТЬ V

ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ГЛАВА 28. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С НЕПРЕРЫВНЫМ СТАБИЛИЗАТОРОМ НА ВЫХОДЕ	576
ГЛАВА 29. DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 15 Вт	579
ГЛАВА 30. DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМЛЕНИЕМ	586
ГЛАВА 31. ТРАНЗИСТОРНЫЙ AC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (ВЫПРЯМИТЕЛЬ)	598
ГЛАВА 32. ЭЛЕКТРОННАЯ НЕРАССЕЙВАЮЩАЯ НАГРУЗКА	611
32.1. Управление преобразователем 1	613
32.2. Силовая часть преобразователя 2	615
32.3. Схема управления ключами преобразователя 2	618
32.4. Управление преобразователем 2	618
32.5. Сетевой инвертор	620