

УДК 621.314.632

ББК 32.85

Д53

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
электротехники и технической диагностики Санкт-Петербургского  
государственного университета аэрокосмического приборостроения

*А.А. Ефимов;*

доктор технических наук, профессор, начальник самостоятельного  
электротехнического отдела ОАО «Концерн» НПО «Аврора»

*Ю.А. Губанов*

**Дмитриев, Б.Ф.**

Д53

Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник по курсу «Полупроводниковые преобразователи» / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский, А.И. Черевко, М.М. Музыка; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – 2-е изд., перераб и доп. – Архангельск: САФУ, 2015. – 556 с.: ил.

ISBN 978-5-261-01027-2

Рассмотрены современная элементная база силовой электроники, методы управления и способы защиты силовых ключей, приведены описание и анализ работы выпрямителей и регуляторов, включая анализ коммутационных процессов и оценку влияния преобразователей на питающую сеть. Дан анализ ущерба от высших гармоник в СЭС и мероприятия по его снижению. Приведены сведения об активных энергетических фильтрах, позволяющих эффективно решать проблему качества электроэнергии в автономных электроустановках. Изложены схемы и режимы работы зависимых и автономных инверторов и преобразователей частоты на их основе, включая НПЧ матричного типа на современных ключевых элементах. Приведено описание нового класса выпрямителей и инверторов, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями. Изложены способы построения систем управления судовыми преобразователями и моделирование преобразователей в среде Micro-Cap. Приведены сведения о реально применяемых преобразователях на судах, а также рассмотрены вопросы обеспечения качества электрической энергии на входе и выходе ПП и улучшение их электромагнитной совместимости с питающей сетью и нагрузкой. Дана оценка влияния качества электроэнергии на виброакустические характеристики судового электрооборудования и самих ПП.

Учебник соответствует государственным образовательным стандартам и предназначен для подготовки бакалавров, специалистов и магистров в области преобразовательной техники, занимающихся наладкой, испытанием и сдачей судового электрооборудования.

УДК 621.314.632

ББК 32.85

ISBN 978-5-261-01027-2

© Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский,  
А.И. Черевко, М.М. Музыка, 2015

© Северный (Арктический) федеральный  
университет имени М.В. Ломоносова, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	5
Глава 1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ..	8
1.1. Базовые структуры силовых полупроводниковых ключей .....	10
1.1.1. Двухслойные полупроводниковые структуры .....	10
1.1.2. Трехслойные биполярные полупроводниковые структуры.....	12
1.1.3. Трехслойные униполярные структуры, или МДП-транзисторы .....	13
1.1.4. Статические индукционные транзисторы .....	16
1.2. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) .....	17
1.3. Однооперационные тиристоры. ....	20
1.4. Запираемые тиристоры. ....	23
1.5. Индукционные тиристоры.....	26
1.6. Полевые тиристоры.....	27
Глава 2. УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КЛЮЧАМИ..	30
2.1. Функции и структуры систем управления силовыми ключами.....	30
2.2. Основные типы формирователей импульсов управления.....	33
2.3. Формирователи импульсов управления биполярных транзисторов .....	34
2.4. Формирователи импульсов управления транзисторов с изолированным затвором .....	37
2.5. Формирователи импульсов управления тиристоров.....	39
2.6. Трансформаторные ФИУ тиристоров .....	42
2.7. Драйверы силовых транзисторов.....	46
2.8. Драйверы тиристоров .....	48
Глава 3. МЕТОДЫ И СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ ....	51
3.1. Основные виды перегрузок по напряжению и току.....	51
3.2. Методы защиты от помех. ....	54
3.3. Защитные цепи тиристорных ключей. ....	59
3.4. Защитные цепи силовых модулей.....	62
3.5. Защита силовых ключей от режимов короткого замыкания. ....	65
3.6. Силовые ключи с интегрированной системой защиты.....	68
Глава 4. ПРОЦЕССЫ В ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ С ВЕНТИЛЯМИ. ....	74
4.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель с активной нагрузкой. ....	74
4.2. Однофазный однополупериодный выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой .....	76
4.3. Однофазный однополупериодный выпрямитель с активно-емкостной нагрузкой .....	77
4.4. Цепь с одним вентилем и активно-индуктивной нагрузкой с противоэдс .....	79
4.5. Однофазный однократный выпрямитель с обратным вентилем.....	82
4.6. Двухполупериодные выпрямители.....	84
4.6.1. Работа однофазного двухтактного неуправляемого выпрямителя со средней точкой на активную нагрузку .....	84

4.6.2. Работа однофазного двухтактного неуправляемого выпрямителя со средней точкой на активно-индуктивную нагрузку .....	89
4.6.3. Работа однофазного двухтактного управляемого выпрямителя со средней точкой на нагрузку с противоэдс .....	91
4.6.4. Работа однофазного двухтактного управляемого выпрямителя со средней точкой на активную нагрузку .....	93
4.6.5. Работа однофазного двухтактного управляемого выпрямителя со средней точкой на активно-индуктивную нагрузку .....	97
4.6.6. Работа однофазного двухтактного управляемого выпрямителя со средней точкой и нулевым вентилем .....	98
4.6.7. Коммутационные процессы в однофазном двухтактном управляемом выпрямителя со средней точкой .....	100
4.6.8. Внешняя характеристика однофазного выпрямителя со средней точкой. ....	103
4.6.9. Энергетические характеристики однофазного выпрямителя со средней точкой .....	104
4.7. Однофазная мостовая схема .....	106
4.7.1. Несимметричные однофазные мостовые схемы выпрямления .....	110
4.7.2. Коммутационные процессы в однофазном мостовом управляемом выпрямителе .....	113
4.8. Трехфазная схема выпрямления со средней точкой .....	115
4.9. Коммутационные процессы в трехфазной схеме выпрямления со средней точкой .....	120
Глава 5. РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ .....	124
5.1. Однофазный регулятор переменного напряжения с активной нагрузкой...	124
5.2. Однофазный регулятор напряжения с активно-индуктивной нагрузкой ....	127
5.3. Регуляторы напряжения на полностью управляемых ключах .....	132
5.4. Трехфазные регуляторы напряжения .....	135
5.5. Регуляторы постоянного напряжения .....	141
5.5.1. Типовые структурные схемы управления импульсными регуляторами .....	141
5.5.2. Импульсный регулятор с последовательным ключом .....	145
5.5.3. Импульсный регулятор с параллельным ключом .....	151
5.5.4. Инвертирующий ШИП с параллельным индуктивным накопителем .....	155
5.5.5. Импульсные регуляторы постоянного тока с изменяемыми полярностью напряжения и направлением тока .....	158
5.5.6. Четырехквadrантный регулятор .....	159
Глава 6. МНОГОФАЗНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....	161
6.1. Трехфазный мостовой преобразователь .....	161
6.1.1. Работа управляемого трехфазного мостового выпрямителя на активную нагрузку .....	164
6.1.2. Работа управляемого трехфазного мостового выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку .....	166
6.1.3. Работа управляемого трехфазного мостового выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку с противоэдс .....	168
6.2. Коммутация токов в трехфазных мостовых выпрямителях .....	173

6.3. Высшие гармоники на входе и выходе симметричного трехфазного мостового тиристорного преобразователя .....	182
6.3.1. Высшие гармоники на входе симметричного трехфазного ТП в симметричных режимах. ....	184
6.3.2. Высшие гармоники на выходе симметричного трехфазного мостового тиристорного преобразователя.....	194
6.4. Энергетические характеристики симметричного трехфазного мостового ТП .....	196
6.5. Высшие гармоники в фазном и линейном напряжениях на входе преобразователей при симметричном и несимметричном управлении.....	198
6.6. Высшие гармоники при несимметрии питающих напряжений .....	205
6.7. Высшие гармоники, обусловленные высокочастотными колебаниями.....	212
6.8. Высшие гармоники напряжения при модуляции питающих напряжений....	219
Глава 7. УЩЕРБ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ, И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ЕГО СНИЖЕНИЯ .....	223
7.1. Техничко-экономическая оценка ущерба от высших гармоник с учетом регулирования возбуждения синхронного генератора.....	223
7.2. Снижение уровней высших гармоник и ущерба от них за счет совершенствования схемы питания и конструкции тиристорных преобразователей. ....	229
7.3. Снижение ущерба за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств.....	232
7.4. Общесистемная компенсация реактивной мощности.....	234
7.5. Повышение качества электроэнергии в СЭЭС с помощью активных и гибридных фильтров.....	239
7.6. Снижение влияния высших гармоник на особо ответственные потребители .....	245
7.6.1. Защита особо ответственных потребителей пассивными фильтрами. ....	245
7.6.2. Защита особо ответственных потребителей активными фильтрами. .	251
7.7. Снижение ущерба за счет применения специальных корректоров коэффициента мощности в составе преобразователей .....	252
7.8. Включение нулевых вентилей .....	255
7.9. Сглаживающие пассивные фильтры .....	256
7.10. Активные энергетические фильтры .....	261
7.10.1. Анализ простейшего активного фильтра с последовательной компенсацией .....	264
7.10.2. Коэффициент эффективности активных фильтров с последовательной компенсацией .....	271
7.10.3. Минимизация технико-экономических показателей комбинированных фильтров .....	272
Глава 8. ИНВЕРТОРЫ .....	278
8.1. Инвертор, ведомый сетью, или зависимый инвертор.....	278
8.2. Трехфазный мостовой инвертор, ведомый сетью .....	281
8.3. Энергетические соотношения инверторов, ведомых сетью.....	283
8.4. Основные характеристики инверторов, ведомых сетью .....	285
8.5. Автономные инверторы тока .....	287
8.6. Однофазный инвертор тока на полностью управляемых ключах .....	288

8.7. Параллельный автономный инвертор тока .....	291
8.8. Последовательный автономный инвертор тока .....	294
8.9. Параллельно-последовательный автономный инвертор тока .....	295
8.10. Автономный инвертор тока с «отсекающими» диодами .....	296
8.11. Автономный инвертор с широтно-импульсным способом формирования кривой выходного тока.....	297
8.12. Трехфазные автономные инверторы тока с тиристорным регулятором ...	298
8.13. Резонансные инверторы .....	300
8.13.1. Последовательный резонансный инвертор .....	300
8.13.2. Параллельный резонансный инвертор .....	302
8.13.3. Резонансные инверторы с обратными диодами .....	303
8.13.4. Резонансные инверторы с широтно-импульсным регулированием напряжения.....	304
8.14. Автономные инверторы напряжения.....	305
8.15. Инверторы напряжения на полностью управляемых силовых ключах.....	307
8.16. Трехфазные инверторы напряжения.....	311
8.17. Управление выходным напряжением и его фильтрация .....	316
8.18. Многоуровневые преобразователи .....	320
8.18.1. Схемы на основе конденсаторов с диодной блокировкой.....	320
8.18.2. Преобразователи с ячейко-гнездовой структурой конденсаторов. ...	322
8.18.3. Преобразователи с ячейко-цепочечной схемой.....	322
Глава 9. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ.....	326
9.1. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока.....	326
9.2. Преобразователи частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией тока тириستоров.....	328
9.3. Преобразователи частоты с непосредственной связью и искусственной коммутацией тока тиристоров.....	335
9.4. Преобразователи частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией .....	342
9.5. Уменьшение искажений выходного напряжения преобразователя частоты.....	345
9.6. Матричные преобразователи частоты .....	348
Глава 10. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ.....	351
10.1. Конструкция трансформатора с вращающимся магнитным полем .....	352
10.2. Электромагнитные процессы в ТВМП .....	356
10.3. Реакция круговой обмотки.....	361
10.3.1. Размагничивающее действие поперечного поля КО.....	363
10.3.2. Реакция КО при смещении плоскости коммутирующих ключей относительно условной геометрической нейтрали ТВМП .....	364
10.4. Влияние конструктивного исполнения ТВМП на качество питающего напряжения .....	364
10.5. Пульсации напряжения на отводах КО .....	372
10.6. Электромагнитные процессы в управляемом выпрямителе с ТВМП при различном числе пар СКЛ.....	374
10.7. Электромагнитные процессы в автономном инверторе с ТВМП .....	380

Глава 11. УПРАВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ..	386
11.1. Назначение СУ. Технические требования и классификация .....	386
11.2. Системы управления регуляторами и коммутаторами переменного напряжения .....	391
11.2.1. Структурные схемы СУ .....	391
11.2.2. Примеры систем управления регуляторами-стабилизаторами переменного тока .....	396
11.3. Системы управления импульсными преобразователями постоянного напряжения .....	399
11.3.1. Системы управления ШИП .....	400
11.3.2. Частотно-импульсное управление .....	403
11.3.3. Системы управления с комбинированной модуляцией. ....	405
11.4. Системы управления автономных инверторов .....	407
11.4.1. Системы управления инверторами тока. ....	407
11.4.2. Системы управления инверторами напряжения .....	410
11.5. Системы управления преобразователей частоты .....	412
11.6. Микропроцессорные системы управления полупроводниковыми преобразователями .....	415
11.7. Диагностика вентильных преобразователей .....	421
11.7.1. Основные понятия и определения .....	421
11.7.2. Алгоритмы и системы диагностирования. ....	422
11.7.3. Модели объектов диагностирования .....	424
11.7.4. Тестовое диагностирование вентильных цепей .....	427
11.7.5. Функциональное диагностирование вентильных преобразователей. .	427
11.7.6. Функциональное диагностирование систем управления. ....	428
11.7.7. Функциональное диагностирование силовой части вентильных преобразователей .....	429
Глава 12. ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ СХЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	431
12.1. Краткое описание среды моделирования MicroCAP .....	432
12.2. Модель однофазного выпрямителя со средней точкой .....	438
12.3. Модель однофазного мостового выпрямителя .....	442
12.4. Модель трехфазного выпрямителя со средней точкой .....	445
12.5. Модель трехфазного мостового выпрямителя .....	448
12.6. Модель однофазного выпрямителя со средней точкой в режиме инвертора, ведомого сетью .....	453
12.7. Модель автономного инвертора напряжения .....	456
12.8. Модель автономного инвертора тока .....	459
12.9. Схемотехническая модель управляемого выпрямителя с ТВМП .....	462
12.10. Схемотехническое моделирование автономных инверторов с ТВМП ...	473
Глава 13. СЭЭС С МОЩНЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ .....	476
13.1. Основные способы построения СЭЭС .....	476
13.2. Основные типы судовых полупроводниковых преобразователей .....	485
13.3. Преобразователи для питания судовой силовой нагрузки .....	486
13.4. Преобразователи для управления судовым электроприводом постоянного тока .....	494

13.5. Управление судовыми тиристорными выпрямителями.....	501
13.6. Судовые инверторы и преобразователи частоты.....	503
13.7. Преобразователи для управления судовым электроприводом переменного тока .....	509
13.8. Управление судовыми инверторами и преобразователями частоты .....	511
Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ И НАГРУЗКОЙ .....	515
14.1. Энергетические показатели качества электромагнитных процессов .....	515
14.2. Энергетические показатели качества использования элементов преобразователей .....	517
14.2.1. Установленная мощность двухобмоточного трансформатора.....	517
14.2.2. Удельные весовые, габаритные и стоимостные показатели .....	519
14.3. Электромагнитная несовместимость .....	520
14.4. Гармоники в судовой сети в несимметричных режимах. ....	526
14.5. Виброакустические характеристики электрооборудования .....	529
14.6. Пути решения проблемы ЭМС.....	535
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	537