

УДК 621.314
ББК 31.261.8
М15

Вильям Маклиман

М15 Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. 3-е изд., пересм. и доп. / Перевод с англ. Попов В. В. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 476 с.

ISBN 978-5-97060-165-5

Книга представляет собой справочник по проектированию и расчету трансформаторов и дросселей. Рассмотрены все ключевые компоненты для проектирования лёгких, высокочастотных трансформаторов аэрокосмических объектов или низкочастотных коммерческих трансформаторов. Включены разделы, связанные с маломощным преобразователем, проектированием роторного трансформатора, планарного трансформатора. Представлена обширная информация о магнитных материалах и характеристиках сердечников. Дается много характеристик материалов в виде таблиц, помогающих быстрее найти удачное проектное решение. Материал организован так, что инженер или техник в процессе чтения книги получают полное понятие об искусстве проектирования трансформатора и дросселя.

Издание предназначено для инженеров и разработчиков силовой электроники, а также может быть полезно студентам вузов и радиолюбителям.

УДК 621.314
ББК 31.261.8

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-0-82475-393-3 (англ.)
ISBN 978-5-97060-165-5 (рус.)

© 2015, CRC Press, Taylor&Francis Group
© Оформление, ДМК Пресс, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	15
Предисловие	16
Благодарность	17
Об авторе.....	17
О книге.....	18
1 Фундаментальные понятия магнетизма	19
1.1. Введение	20
1.2. Магнитные свойства в свободном пространстве	20
1.3. Усиление магнитного поля.....	21
1.4. Простейший трансформатор.....	24
1.5. Магнитный сердечник	24
1.6. Фундаментальные характеристики магнитного сердечника	26
1.7. Зависимость $B(H)$ при повторном перемагничивании сердечника.....	28
1.8. Магнитная проницаемость.....	28
1.9. Магнитодвижущая сила (МДС) и намагничивающая сила (H).....	32
1.10. Магнитное сопротивление.....	34
1.11. Воздушный зазор.....	35
1.12. Управление величиной постоянного магнитного потока с помощью воздушного зазора.....	38
1.13. Типы воздушных зазоров	39
1.14. Краевой магнитный поток	40
1.15. Магнитная проницаемость материала.....	41
1.16. Воздушные зазоры	42
1.17. Краевой магнитный поток, фактор F	42
1.18. Расчёт длины зазора в дросселе постоянного тока	43
1.19. Краевой магнитный поток и способ намотки катушки	45
1.20. Краевой магнитный поток в уплотнённой среде	45
1.21. Краевой магнитный поток в порошковых сердечниках	46
2 Магнитные материалы и их характеристики	48
2.1. Введение	49
2.2. Насыщение.....	49
2.3. Остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c	50
2.4. Магнитная проницаемость μ	50
2.5. Потери на гистерезис, сопротивление потерь ρ в сердечнике	50
2.6. Кремниевая сталь	51
2.7. Тонкая лента из никелевого сплава.....	51
2.8. Металлическое стекло	55

2.9. Магнито-мягкие ферриты	59
2.10. Марганец-цинковые ферриты	61
2.11. Никель-цинковые ферриты	61
2.12. Ферриты: обзор	62
2.13. Порошковые сердечники из молибденового пермаллоя	63
2.14. Железные порошковые сердечники	64
2.15. Потери в сердечнике	70
2.16. Уравнения для потерь в сердечнике	71
2.17. Отбор магнитных материалов	74
2.18. Несимметричное намагничивание	74
2.19. Характеристики материала	75
2.20. Уточнение границ области насыщения магнитного материала	77
2.21. Условия и результаты измерений	80
2.22. Теория насыщения магнитного материала	84
2.23. Влияние воздушного зазора	85
2.24. Эффект введения зазора	86
2.25. Составной сердечник	93
2.26. Заключение	96

3 Магнитные сердечники	98
3.1. Введение	99
3.2. Типы и конструкции сердечников	100
3.3. Типы материалов сердечника	101
3.4. Вихревые токи и изоляция	101
3.5. Стальные пластины	102
3.6. Отжиг и снятие стресса	104
3.7. Сборка пакета пластин и их взаимная ориентация	104
3.8. Уплотнение потока	105
3.9. Ток возбуждения	106
3.10. Ленточные С-, ЕЕ- и тороидальные сердечники	107
3.11. Ленточные тороидальные сердечники	109
3.12. Порошковый тороидальный сердечник	109
3.13. Коэффициент заполнения сталью	110
3.14. Данные для проектирования сердечников из ЕІ-пластин	111
3.15. Данные для проектирования сердечников из UІ-пластин	112
3.16. Данные для проектирования сердечников из LL-пластин	113
3.17. Данные для проектирования сердечников из DU-пластин	115
3.18. Данные для проектирования трёхфазных трансформаторов на основе стальных пластин	116
3.19. Данные для проектирования ленточных витых С-сердечников	117
3.20. Очертания ленточных намотанных ЕЕ-сердечников	118
3.21. Параметры ленточных витых тороидальных сердечников	119
3.22. Параметры ЕЕ-сердечников из феррита	121
3.23. Параметры планарных ферритовых ЕЕ- и ЕІ-сердечников	122

3.24. Параметры ферритовых ЕС-сердечников	123
3.25. Параметры ферритовых ETD-сердечников.....	124
3.26. Параметры ферритовых ETD-сердечников.....	125
3.27. Параметры ферритовых ER-сердечников	126
3.28. Параметры ферритовых EFD-сердечников	127
3.29. Параметры ферритовых EPC-сердечников	128
3.30. Параметры ферритовых РС-сердечников	129
3.31. Параметры ферритовых EP-сердечников	130
3.32. Параметры ферритовых PQ-сердечников.....	131
3.33. Параметры низкопрофильных ферритовых PQ-сердечников.....	133
3.34. Параметры ферритовых RM-сердечников.....	134
3.35. Параметры низкопрофильных ферритовых RM-сердечников.....	135
3.36. Параметры ферритовых DS-сердечников	136
3.37. Параметры ферритовых UUR-сердечников	137
3.38. Параметры ферритовых UUS-сердечников	138
3.39. Параметры тороидальных ферритовых сердечников.....	139
3.40. Параметры тороидальных порошковых MPP-сердечников.....	140
3.41. Параметры порошковых железных тороидальных сердечников	142
3.42. Параметры тороидальных сендастовых порошковых сердечников.....	143
3.43. Параметры тороидальных порошковых сердечников High Flux	145
3.44. Параметры железных порошковых EE-сердечников	146
3.45. Параметры сендастовых порошковых EE-сердечников.....	148

4	Использование окна сердечника, обмоточный провод и изоляция	149
4.1.	Коэффициент заполнения окна.....	150
4.2.	Изоляция провода, S_1	151
4.3.	Коэффициент заполнения обмоткой.....	152
4.4.	Эффективная площадь окна.....	155
4.5.	Коэффициент влияния изоляции.....	157
4.6.	Заключение.....	158
4.7.	Коэффициент заполнения окна для ферритовых сердечников с катушкой	159
4.8.	Провод круглого и квадратного сечения с диаметром и стороной 0.0254 мм	161
4.9.	Обмоточный провод	161
4.10.	Плёночная изоляция обмоточного провода	162
4.11.	Таблица проводов.....	163
4.12.	Изоляция, которую можно паять	166
4.13.	Укреплённый обмоточный провод.....	167
4.14.	Базовая плёночная изоляция.....	167
4.15.	Методы нанесения укрепляющего покрытия	168
4.16.	Миниатюрный обмоточный провод прямоугольного сечения	168
4.17.	Многожильный провод и поверхностный эффект.....	169
4.18.	Уменьшение скин-эффекта в трансформаторах.....	170

4.19. Расчёт скин-эффекта в дросселе постоянного тока	171
4.20. Многожильный провод типа литцендрат	174
4.21. Эффект близости	175
4.22. Эффект близости в трансформаторах	176
4.23. Высокочастотные трансформаторы с многослойными обмотками	176
4.24. Анализ эффекта близости при помощи кривых Доула	179
4.25. Специальные провода	180
4.26. Провод с тройной изоляцией	181
4.27. Литцендрат с тройной изоляцией	182
4.28. Многожильный обмоточный провод	182
4.29. Стандартная фольга	183
4.30. Использование фольги	184
4.31. Расчёт средней длины витка	187
4.32. Расчёт средней длины витка тороидального сердечника	188
4.33. Расчёт сопротивления меди обмотки	188
4.34. Расчёт веса меди	188
4.35. Электрический изоляционный материал	189
4.36. Источники	189

5 Этапы проектирования трансформатора	190
5.1. Введение	191
5.2. Общие проблемы проектирования	191
5.3. Способность передавать мощность	192
5.4. Взаимосвязь A_p и способности сердечника передавать мощность	193
5.5. Взаимосвязь K_g с диапазоном регулирования нагрузки и способностью передавать мощность	193
5.6. Произведение площадей трансформатора A_p	194
5.7. Объём трансформатора и произведение площадей A_p	194
5.8. Вес трансформатора и произведение площадей A_p	197
5.9. Площадь поверхности трансформатора в зависимости от произведения площадей A_p	198
5.10. Плотность тока трансформатора J и произведение площадей сердечника A_p	202
5.11. Геометрия сердечника трансформатора и произведение площадей сердечника	204
5.12. Вес трансформатора в зависимости от диапазона регулирования нагрузки	206
5.13. Источники	208

6 Эффективность трансформаторов и дросселей, влияние изменения нагрузки и температуры	209
6.1. Введение	210
6.2. Эффективность трансформатора	210

6.3. Максимальная эффективность.....	210
6.4. Рассеивание мощности трансформатором посредством радиации и конвекции.....	212
6.5. Рост температуры в зависимости от площади рассеивающей поверхности A_c	213
6.6. Площадь поверхности, необходимая для рассеивания выделяющегося тепла.....	214
6.7. Требуемая площадь поверхности A_c	215
6.8. Зависимость напряжения от нагрузки	216
6.9. Источники.....	218

7 Проектирование силового трансформатора	219
7.1. Введение	220
7.2. Общие проблемы проектирования.....	220
7.3. Способность передавать мощность.....	221
7.4. Связь выходной мощности P_o и расчётной мощности P_t	222
7.5. Многообмоточные трансформаторы	224
7.6. Зависимость напряжения от нагрузки.....	226
7.7. Взаимосвязь K_g и способности трансформатора поддерживать стабильное напряжение на выходе при изменении нагрузки	227
7.8. Взаимосвязь A_p и способности трансформатора передавать мощность.....	228
7.9. Сердечники с одинаковым произведением площадей	229
7.10. Проектирование 250 Вт изолирующего трансформатора с использованием коэффициента, характеризующего геометрию сердечника K_g	230
7.11. Проектирование трансформатора на 38 Вт и 100 кГц с использованием коэффициента K_g , характеризующего геометрию сердечника	234

8 Проектирование дросселей постоянного тока с зазором в магнитопроводе	243
8.1. Введение	244
8.2. Критическая индуктивность для дросселя выпрямителя синусоидального напряжения	244
8.3. Критическая индуктивность дросселя для регулятора напряжения понижающего типа	245
8.4. Материалы сердечников, используемых в преобразователях с широтно-импульсным регулированием.....	248
8.5. Основополагающие положения	249
8.6. Краевой поток.....	251
8.7. Дроссели	252
8.8. Связь произведения площадей сердечника и способности дросселя передавать энергию	253

8.9. Связь коэффициента геометрии K_g и способности дросселя передавать энергию	253
8.10. Пример проектирования дросселя с зазором с использованием коэффициента геометрии сердечника K_g	254
8.11. Пример проектирования дросселя с зазором с использованием метода произведения площадей сердечника A_p	259

9 Проектирование дросселей постоянного тока с порошковыми сердечниками	265
9.1. Введение	266
9.2. Порошковые сердечники из молибденового пермаллоя (МРР)	266
9.3. Порошковые сердечники типа High Flux (HF)	266
9.4. Сендастовые порошковые сердечники (Magnetics Kool Mu)	267
9.5. Железные порошковые сердечники	267
9.6. Дроссели	268
9.7. Отношение произведения площадей A_p к способности дросселя передавать энергию	268
9.8. Отношение коэффициента геометрии K_g к способности дросселя передавать энергию	269
9.9. Фундаментальные положения	270
9.10. Проектирование тороидального порошкового сердечника с использованием коэффициента геометрии K_g	272
9.11. Проектирование тороидального порошкового сердечника с использованием произведения площадей A_p	277

10 Проектирование дросселей переменного тока	282
10.1. Введение	283
10.2. Требования	283
10.3. Связь произведения площадей A_p сердечника с вольт-амперами дросселя	283
10.4. Связь коэффициента геометрии K_g с вольт-амперами дросселя	284
10.5. Фундаментальные соотношения	284
10.6. Краевой поток	285
10.7. Пример проектирования дросселя переменного тока	288
10.8. Источники	292

11 Трансформаторные стабилизаторы переменного напряжения	293
11.1. Введение	294
11.2. Регулировочные характеристики	294
11.3. Электрические параметры	294
11.4. Уравнения для проектирования	296
11.5. Пример проектирования	299

11.6. Пример проектирования дросселя переменного тока.....	304
11.7. Источники	307

12 Проектирование трёхфазного трансформатора	308
12.1. Введение	309
12.2. Основные схемы соединения обмоток трансформатора	309
12.3. Сравнение физических размеров трансформаторов.....	309
12.4. Фазный и линейный ток в треугольнике	311
12.5. Фазное, линейное напряжение и ток в схеме трёхфазной звезды.....	312
12.6. Сравнение мощностей в однофазной и многофазной системах	312
12.7. Многофазные выпрямительные схемы.....	313
12.8. Произведение площадей A_p и коэффициент геометрии K_g для трёхфазных трансформаторов	316
12.9. Связь выходной и расчётной мощности.....	317
12.10. Связь коэффициента геометрии с зависимостью выходного напряжения силового трансформатора от нагрузки	318
12.11. Связь произведения площадей сердечника A_p со способностью трансформатора передавать мощность	319
12.12. Пример проектирования трёхфазного трансформатора	319

13 Проектирование трансформатора обратного преобразователя напряжения.....	324
13.1. Введение	325
13.2. Передача энергии.....	325
13.3. Режим разрывного тока.....	326
13.4. Режим непрерывного тока.....	326
13.5. Граничный режим тока дросселя	327
13.6. Понижающий регулятор напряжения.....	327
13.7. Повышающий преобразователь напряжения	330
13.8. Инвертирующий повышающе-понижающий преобразователь.....	333
13.9. Повышающе-понижающий преобразователь с трансформаторным выходом.....	335
13.10. Поверхностный эффект	339
13.11. Пример расчёта повышающего преобразователя, работающего в режиме разрывного тока	346
13.12. Поверхностный эффект	347
13.13. Проектирование дросселя для повышающего корректора коэффициента мощности.....	352
13.14. Стандартная схема повышающего преобразователя	353
13.15. Корректор коэффициента мощности на основе повышающего преобразователя	353
13.16. Пример проектирования дросселя с непрерывным током для ККМ на основе повышающего преобразователя	354

13.17. Поверхностный эффект	355
13.18. Источники.....	359

14 Проектирование трансформатора и выходного дросселя прямоугольного преобразователя	360
14.1. Введение	361
14.2. Описание работы схемы.....	361
14.3. Сравнение траекторий перемагничивания сердечника в координатах $B-H$	362
14.4. Проектирование трансформатора с использованием коэффициента геометрии K_g	365
14.5. Расчёт дросселя фильтра прямоугольного преобразователя	370
14.6. Проектирование выходного дросселя с использованием коэффициента геометрии K_g	372

15 Проектирование входного фильтра	378
15.1. Введение	379
15.2. Конденсатор.....	379
15.3. Дроссель.....	380
15.4. Осцилляция.....	381
15.5. Подключение первичного источника мощности.....	382
15.6. Резонансный заряд.....	383
15.7. Процедура проектирования дросселя входного фильтра.....	385
15.8. Данные для проектирования входного фильтра.....	386
15.9. Источники.....	389

16 Проектирование трансформатора тока.....	390
16.1. Введение	391
16.2. Анализ составляющих входного тока.....	391
16.3. Уникальность трансформатора тока.....	393
16.4. Примеры схем, использующих трансформатор тока.....	394
16.5. Пример проектирования трансформатора тока.....	396
16.6. Результаты проектирования	398

17 Ёмкость обмотки и индуктивность рассеивания	400
17.1. Введение	401
17.2. Паразитные эффекты	401
17.3. Поток рассеивания.....	402
17.4. Минимизация индуктивности рассеивания	405
17.5. Ёмкость обмотки.....	406
17.6. Межвитковая ёмкость обмотки	408

17.7. Межслойная ёмкость обмотки трансформатора	408
17.8. Межобмоточная ёмкость.....	409
17.9. Паразитная ёмкость.....	410
17.10. Источники.....	411

18 Проектирование маломощного преобразователя	412
18.1. Введение	413
18.2. Преобразователь напряжения.....	413
18.3. Регулирование и фильтрация.....	414
18.4. Преобразователь тока.....	415
18.5. Маломощный преобразователь	415
18.6. Регулирование и фильтрация.....	416
18.7. Временные диаграммы токов и напряжений маломощного преобразователя	416
18.8. Технология на марше.....	419
18.9. Коэффициент использования окна	419
18.10. Температурная стабильность	420
18.11. Определение расчётной мощности	420
18.12. Расчётные соотношения маломощного преобразователя	421
18.13. Проектирование трансформатора на основе рассчитанного коэффициента геометрии K_g	425
18.14. Обзор результатов проектирования	429
18.15. Источники.....	432

19 Проектирование роторного трансформатора	434
19.1. Введение	435
19.2. Базовая конструкция роторного трансформатора.....	435
19.3. Особенности работы с кривой напряжения прямоугольной формы.....	436
19.4. Индуктивность рассеивания роторного трансформатора.....	437
19.5. Двухтактный резонансный преобразователь тока.....	439
19.6. Трудности при проектировании роторного трансформатора	440
19.7. Источники.....	442

20 Планарные трансформаторы	443
20.1. Введение	444
20.2. Базовая конструкция планарного трансформатора	444
20.3. Планарные интегральные магнетики с печатными обмотками	446
20.4. Геометрия сердечника	447
20.5. Уравнения для проектирования планарного трансформатора и дросселя.....	448
20.6. Коэффициент использования окна сердечника.....	449
20.7. Плотность тока J	450

20.8. Печатные обмотки.....	453
20.9. Расчёт средней длины витка.....	454
20.10. Сопротивление обмотки и рассеиваемая мощность	454
20.11. Ёмкость печатной обмотки	455
20.12. Проектирование планарного дросселя	456
20.13. Внешний вывод обмотки	457
20.14. Базовые материалы для печатных плат.....	458
20.15. Сборка и монтаж сердечника	459
20.16. Источники.....	460

21	Истоки уравнений проектирования	461
21.1.	Связь выходной мощности P_o с расчётной мощностью P_t	462
21.2.	Проектирование трансформатора на основе коэффициента геометрии K_g	463
21.3.	Проектирование трансформатора на основе произведения площадей сердечника A_p	466
21.4.	Проектирование дросселя на основе коэффициента геометрии сердечника K_g	467
21.5.	Проектирование дросселя на основе произведения площадей сердечника.....	470
21.6.	Зависимость выходного напряжения трансформатора от нагрузки	473