

УДК 621.373(075.8)

ББК 32.841я73-1

Г20

Рецензенты: профессор МЭИ (ТУ) Кулешов В. Н.,
профессор СпбГЭТУ (ЛЭТИ) Митрофанов А. В.

Г20 Гарматюк С. С.

Задачник по устройствам генерирования и формирования радиосигналов. Учебное пособие для вузов. Рекомендовано УМО.– М.: ДМК Пресс, 2015. – 672 с.

ISBN 978-5-97060-253-9

Книга содержит 2000 задач и вопросов по характеристикам и параметрам высокочастотных активных элементов; электромагнитным цепям ВЧ и СВЧ; энергетическим соотношениям в генераторах; ключевым и широкополосным усилителям; устройствам сложения мощностей; умножителям частоты; автогенераторам и синтезаторам частот; передатчикам с амплитудной, однопольной, импульсной и угловой модуляцией; генераторам на пролётных клистронах, магнетронах, митронах, ЛБВ; ламповым, транзисторным и диодным генераторам СВЧ, а также квантовым генераторам.

По каждому разделу задачника даны основные расчетные соотношения, приближённые к практическим. Для всех задач приведены решения и ответы. В приложениях помещены справочные материалы и программы расчетов.

Задачник рассчитан на студентов, изучающих дисциплины «Устройства генерирования и формирования радиосигналов» или «Радиопередающие устройства», а также смежные дисциплины: «Теория радиотехнических цепей», «Электроника», «Схемотехника», «Устройства СВЧ и антенны», «Теория колебаний» и др. Книга содержит большое количество схем, расчетных формул и примеров расчета и потому будет полезна в качестве справочника студентам при курсовом и дипломном проектировании, инженерно-техническим работникам и квалифицированным радиолюбителям.

Гарматюк Сергей Сергеевич

ЗАДАЧНИК

по устройствам генерирования и формирования радиосигналов

Учебное пособие для вузов

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dmkpress@gmail.com

Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Паранская Н. В.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Формат 60×90¹/₁₆.

Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 41,16. Тираж 100 экз.

Сайт издательства: www.dmk.rf

ISBN 978-5-97060-253-9

© Гарматюк С. С., 2012

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2015

КРАТКОЕ ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	4
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	12
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ	15
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ ...	16
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	20
2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	37
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.....	45
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРАХ ...	77
5. КЛЮЧЕВЫЕ УСИЛИТЕЛИ	87
6. СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ.....	102
7. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ.....	114
8. УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ.....	136
9. АВТОГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ	143
10. ПЕРЕДАТЧИКИ С АМПЛИТУДНОЙ И ОДНОПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	245
11. ПЕРЕДАТЧИКИ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ.....	255
12. ПЕРЕДАТЧИКИ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	277
13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ.....	297
14. ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ, ТРАНЗИСТОРАХ И ДИОДАХ	330
15. КЛИСТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ.....	384
16. ГЕНЕРАТОРЫ НА ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТИПА О	397
17. ГЕНЕРАТОРЫ МАГНЕТРОННОГО ТИПА.....	415
18. КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ	434
РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ	451
ПРИЛОЖЕНИЯ	658
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	667

ОГЛАВЛЕНИЕ

КРАТКОЕ ОГЛАВЛЕНИЕ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	12
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ.....	15
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ....	16
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ	
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	20
1.1. Статические характеристики генераторных ламп и транзисторов.....	20
1.2. Аппроксимация статических характеристик ламп и транзисторов.....	23
1.3. Параметры ламп и транзисторов	24
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	30
Общие задачи и вопросы	30
Характеристики и параметры генераторных ламп.....	30
Характеристики и параметры биполярных транзисторов.....	31
Характеристики и параметры МДП-транзисторов.....	33
Характеристики и параметры MOSFET-транзисторов.....	34
Характеристики и параметры IGBT-транзисторов	35
Сравнение свойств высокочастотных АЭ.....	35
2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	37
2.1. Классификации режимов по напряженности	37
2.2. Нагрузочные характеристики генератора с внешним возбуждением	39
2.3. Гармонический анализ косинусоидальных импульсов	39
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	41
Напряженность режима.....	41
Угол отсечки.....	42
Общие задачи и вопросы	43
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ	
ГЕНЕРАТОРОВ.....	45
3.1. Основные параметры колебательных контуров.....	45
3.2. Параллельный колебательный контур	46
3.3. Последовательный колебательный контур.....	49
3.4. Связанные колебательные контуры	51
3.5. Входные цепи генераторов.....	52
3.6. Выходные цепи генераторов	54
3.7. Схемы генераторов	57

3.8. Фильтрация высших гармоник	59
3.9. Блокировочные и разделительные элементы	61
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	63
Общие задачи и вопросы	63
Параллельный колебательный контур	64
Последовательный колебательный контур	66
Связанные колебательные контуры	66
Входные цепи генераторов	68
Выходные цепи генераторов	69
Схемы генераторов	70
Фильтрация высших гармоник	71
Блокировочные и разделительные элементы	73
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРАХ ...	77
4.1. Соотношения для выходных цепей генераторов	77
4.2. Соотношения для входных цепей генераторов	79
4.3. Режимы работы генераторов	79
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	80
Общие задачи и вопросы	80
Энергетические соотношения во входной цепи	81
Энергетические соотношения в выходной цепи	81
Расчет генераторов на максимум общего КПД	86
5. КЛЮЧЕВЫЕ УСИЛИТЕЛИ	87
5.1. Общие расчетные соотношения	87
5.2. Ключевые широкополосные усилители	90
5.3. Усилители с последовательным колебательным контуром в цепи нагрузки	92
5.4. Усилители с параллельным колебательным контуром в цепи нагрузки	94
5.5. Ключевые усилители класса Е	95
5.6. Активные элементы ключевых генераторов	96
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	97
Общие задачи и вопросы	97
Широкополосные КУМ	98
КУМ с последовательным колебательным контуром в цепи нагрузки	100
КУМ с параллельным колебательным контуром в цепи нагрузки ..	100
Сравнение схем КУМ	101
6. СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ	102
6.1. Параллельное включение активных элементов	102
6.2. Двухтактное включение активных элементов	103

6.3. Мостовые схемы сложения мощностей	105
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	108
Общие вопросы	108
Параллельное включение активных элементов	108
Двухтактное включение активных элементов	110
Мостовые схемы сложения мощностей	111
7. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ.....	114
7.1. Абсолютная полоса частот усилителя. Согласование импедансов	114
7.2. Усилители с переключаемыми фильтрами	121
7.3. Усилители с раздельными полосами усиления	122
7.4. Усилители с распределенным усилением.....	123
7.5. Двухтактные усилители.....	124
7.6. Трансформаторы на линиях	126
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	127
Общие вопросы	127
Цепи согласования.....	127
Принцип постоянства полосы	128
Параметры цепей согласования	128
Усилители с переключаемыми фильтрами.....	131
Усилители с раздельными полосами усиления	132
Усилители с распределенным усилением.....	132
Широкополосные трансформаторы	133
Схемы и режимы работы широкополосных усилителей	134
8. УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ.....	136
8.1. Классификация умножителей частоты.....	136
8.2. Параметры умножителей частоты	137
8.3. Умножители частоты с активной нелинейностью.....	137
8.4. Умножители частоты с нелинейной реактивностью	138
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	139
Общие задачи и вопросы	139
Умножители частоты с активной нелинейностью.....	140
Умножители частоты с нелинейной реактивностью	142
9. АВТОГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ	143
9.1. Структурные схемы и типы автогенераторов	143
9.2. Автогенераторы с цепью внешней обратной связи	145
9.3. Автогенераторы на двухполюсниках с отрицательным дифференциальным сопротивлением.....	148
9.4. Схемы автогенераторов.....	151

9.5. Расчет электронного режима автогенераторов.....	158
9.6. Расчет колебательной системы	163
9.7. Кварцевые автогенераторы.....	166
9.8. Автогенераторы на ПАВ.....	174
9.9. Синхронизация и затягивание частоты автогенераторов....	179
9.10. Стабильность частоты автогенераторов	183
9.11. Нелинейное уравнение автогенератора	189
9.12. Метод медленно меняющихся амплитуд. Квазилинейный метод.....	191
9.13. Процесс установления амплитуды автоколебаний	195
9.14. Шумы в автогенераторах	196
9.15. Флуктуации частоты и фазы автоколебаний.....	199
9.16. Паразитная автогенерация	200
9.17. Синтезаторы стабильных частот	203
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	212
Общие задачи и вопросы	212
Автогенераторы с цепью внешней обратной связи	214
Автогенераторы на двухполюсниках с отрицательным дифференциальным сопротивлением.....	217
Схемы автогенераторов.....	218
Расчёт автогенераторов.....	219
Кварцевые резонаторы	220
Кварцевые автогенераторы	222
Управляемые кварцевые генераторы	223
ПАВ-резонаторы и ПАВ-линии задержки.....	224
Автогенераторы и передатчики на ПАВ	224
Синхронизация частоты автогенераторов.....	225
Затягивание частоты автогенераторов	226
Эффект длинной линии	227
Стабильность частоты автогенераторов.....	228
Измерение нестабильности частоты	229
Нелинейное уравнение автогенератора	230
Метод медленно меняющихся амплитуд. Квазилинейный метод....	231
Процесс установления амплитуды автоколебаний.....	233
Шумы в автогенераторах	234
Флуктуации частоты и фазы автоколебаний.....	237
Паразитная автогенерация	239
Общие задачи и вопросы по синтезаторам частот.....	241
Прямые синтезаторы частот.....	242
Синтезаторы с фазовой автоподстройкой частоты	243
Цифровые вычислительные синтезаторы	244
Сравнение свойств синтезаторов	244

10. ПЕРЕДАТЧИКИ С АМПЛИТУДНОЙ И ОДНОПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	245
10.1. Амплитудная модуляция	245
10.2. Однополосная модуляция	247
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	249
Общие задачи и вопросы	249
Передачики с амплитудной модуляцией	249
Передачики с однополосной модуляцией	253
11. ПЕРЕДАТЧИКИ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ.....	255
11.1. Общие соотношения при импульсной модуляции	255
11.2. Модуляторы с частичным разрядом накопительной емкости	256
11.3. Модуляторы с полным разрядом формирующей линии.....	260
11.4. Коммутаторные приборы.....	263
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	268
Общие задачи и вопросы	268
Модуляторы с частичным разрядом накопительной емкости	269
Модуляторы с полным разрядом формирующей линии	273
Коммутаторные приборы	276
12. ПЕРЕДАТЧИКИ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	277
12.1. Общие соотношения при угловой модуляции	277
12.2. Параметры варикапов	280
12.3. Общие соотношения для модуляторов на емкостях p - n -переходов	283
12.4. Автотрансформаторная связь модулятора с контуром автогенератора	285
12.5. Емкостная связь модулятора с контуром автогенератора	287
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	288
Общие задачи и вопросы	288
Передачики с частотной модуляцией	289
Параметры варикапов.....	290
Частотные модуляторы на варикапах.....	292
Передачики с фазовой модуляцией. Преобразование фазовой модуляции в частотную	294
Усилители мощности сигналов с УМ.....	295
13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ.....	297
13.1. Параметры колебательных систем генераторов СВЧ.....	297
13.2. Тороидальные резонаторы.....	299
13.3. Параметры линий с распределенными постоянными	300

13.4. Параметры резонаторов на короткозамкнутых отрезках линий	304
13.5. Параметры резонаторов на разомкнутых отрезках линий.....	309
13.6. Конструкции резонаторов на отрезках линий.....	311
13.7. Использование четвертьволновых и полуволновых резонаторов	312
13.8. Связь резонаторов с нагрузкой.....	315

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ 317

Общие задачи и вопросы	317
Тороидальные резонаторы	318
Резонаторы на отрезках линий.....	319
Двухпроводные резонаторы	320
Коаксиальные резонаторы.....	321
Полосковые резонаторы	324
Волноводные резонаторы.....	325
Связь с нагрузкой.....	325
Резонансные волномеры и режекторные фильтры	328

14. ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ, ТРАНЗИСТОРАХ И ДИОДАХ 330

14.1. Генераторы СВЧ на электронных лампах	330
14.2. Генераторы СВЧ на транзисторах.....	336
14.3. Генераторы СВЧ на диодах.....	347

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ 364

Общие задачи и вопросы по ламповым генераторам	364
Время пролета электронов в лампах	365
Параметры генераторных ламп СВЧ	366
Схемы и конструкции ламповых генераторов СВЧ	366
Параметры колебательных систем ламповых генераторов	368
Ламповые автогенераторы СВЧ	369
Общие вопросы по транзисторным генераторам СВЧ	371
Схемы транзисторных усилителей СВЧ	372
Повышение КПД транзисторных генераторов.....	373
Транзисторные автогенераторы СВЧ	374
Конструкции транзисторных генераторов СВЧ	374
Общие вопросы по диодным генераторам.....	376
Генераторы на туннельных диодах.....	376
Генераторы на лавинно-пролетных диодах.....	377
Генераторы на диодах Ганна	378
Конструкции и эквивалентные схемы диодных генераторов.....	379
Управление колебаниями диодных генераторов	381
Стабилизация частоты диодных автогенераторов	381
Способы повышения КПД диодных генераторов	382

Диодные усилители мощности.....	382
15. КЛИСТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ.....	384
15.1. Характеристики и параметры клистронов.....	384
15.2. Амплитудная и импульсная модуляция пролетных клистронов	388
15.3. Фазовая модуляция пролетных клистронов.....	389
15.4. Энергетические соотношения в двухрезонаторных пролетных клистромах.....	390
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	391
Общие задачи и вопросы	391
Характеристики и параметры пролетных клистронов	392
Модуляция пролетных клистронов.....	394
Энергетические соотношения в двухрезонаторных пролетных клистромах.....	395
16. ГЕНЕРАТОРЫ НА ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ	
ТИПА О	397
16.1. Классификация и особенности ламп бегущей волны.....	397
16.2. Замедляющие структуры.....	400
16.3. Характеристики и параметры ЛБВ.....	403
16.4. Усиление и модуляция ЛБВ	404
16.5. Экспериментальные характеристики ЛОВ.....	408
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	409
Общие вопросы.....	409
Замедляющие структуры	409
Характеристики и параметры ЛБВ	411
Усиление и модуляция ЛБВ.....	412
17. ГЕНЕРАТОРЫ МАГНЕТРОННОГО ТИПА.....	415
17.1. Особенности генераторов магнетронного типа.....	415
17.2. Параметры генераторов магнетронного типа	419
17.3. Рабочие и нагрузочные характеристики магнетронов	421
17.4. Рабочие и нагрузочные характеристики митронов	422
17.5. Рабочие и нагрузочные характеристики амплитронов	424
17.6. Синхронизация генераторов.....	425
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	426
Общие задачи и вопросы	426
Параметры магнетронов и митронов	428
Рабочие характеристики магнетронов и митронов.....	428
Нагрузочные характеристики магнетронов и митронов.....	429
Стабилизация и синхронизация частоты	430
Модуляция магнетронов и митронов.....	431

Параметры амплитронов	432
Нагрузочные характеристики амплитронов.....	433
Модуляция платинотронов	433
18. КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ	434
18.1. Общие расчетные соотношения.....	434
18.2. Оптические резонаторы	435
18.3. Параметры лазеров.....	436
18.4. Модуляция оптического излучения.....	438
18.5. Использование лазеров	442
ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ	443
Параметры лазеров.....	443
Стабильность частоты лазеров.....	445
Модуляция лазеров	446
Использование лазеров.....	448
РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ.....	451
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	658
1. Параметры генераторных ламп ВЧ.....	658
2. Параметры биполярных транзисторов.....	658
3. Параметры мощных МДП-транзисторов.....	659
4. Параметры MOSFET-транзисторов.....	660
5. Параметры IGBT-транзисторов.....	660
6. Коэффициенты разложения косинусоидального импульса ..	661
7. Таблица коэффициентов разложения для косинусоидального импульса.....	661
8. Графики коэффициентов разложения для косинусоидального импульса.....	662
9. Программы расчета резонансных частот резонаторов	663
10. Программы расчета длин резонаторов для основного типа колебаний и первого продольного обертона.....	665
11. Удельное поверхностное сопротивление проводников R_{11}	666
12. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков.....	666
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	667