

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 E	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 отдельными 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 отдельными 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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие ориентировано на типовую программу курса «Устройства генерирования и формирования радиосигналов» специальности «Радиотехника». В методическом плане автор опирался на принципы, заложенные выдающимися учеными – профессорами ЛЭТИ, МЭИ и МАИ: С.И. Бычковым, С.А. Дробовым, С.И. Евтяновым, И.В. Лебедевым, М.С. Нейманом и другими – одними из создателей отечественной школы радиотехники.

Пособие содержит задачи и вопросы по характеристикам и параметрам 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, однополосной, импульсной и угловой модуляцией; генераторам на пролётных клистронах, магнетронах, митронах, ЛОВ и ЛБВ; ламповым, транзисторным и диодным генераторам СВЧ, а также квантовым генераторам. По каждому разделу даны основные расчетные соотношения, приближённые к практическим. Для всех задач приведены решения и ответы. В приложениях помещены справочные материалы и программы расчетов, необходимые для решения задач.

Для удобства поиска нужного раздела подробное оглавление дополнено кратким. Для заинтересованного читателя приведен краткий библиографический список. Список сформирован в хронологическом порядке и включает наиболее значимые учебники, учебные и справочные пособия, статьи и монографии за последние полвека. Автор приносит извинения тем, чьи работы незаслуженно остались неназванными. Ссылки на литературу даны по узким вопросам и в случае существования противоречивых сведений.

Хотя большинство задач родилось на кафедре антенн и радиопередающих устройств ТТИ ЮФУ, автор не имеет возможности указать первоисточник каждой из приведенных в пособии задач. В разные годы автору попадались различные внутривузовские издания, книги и другие источники, дать ссылки на которые теперь невозможно. Список литературы и в этом отношении далек от полноты.

Современная наука и техника развиваются невероятно быстро, особенно в области разработки новых электронных устройств. Поэтому учебное пособие призвано знакомить читателя не только с современным состоянием проблемы, но и с фундаментальными за-

кономерностями, знание которых необходимо для завтрашнего дня. В книге рассмотрены свойства перспективных приборов (MOSFET- и IGBT-транзисторов, реверсивно-включаемых диодов и др.). Значительное внимание уделено перспективным схемам ключевых и широкополосных усилителей, высокостабильным автогенераторам, в том числе на ПАВ, цифровым синтезаторам частот. Рассмотрены актуальные вопросы согласования импедансов, анализа переходных процессов в автогенераторах и влияния шумов на частоту и фазу автоколебаний, проектирования электромагнитных цепей генераторов СВЧ и др.

Основная цель задачника – углубление и закрепление теоретических знаний, полученных студентами при изучении курса, а также выработка навыков в решении практических задач. Эти навыки необходимы и в инженерной, и в научной деятельности. Помимо задач, связанных с выполнением расчетов, помещены вопросы. Назначение этих вопросов – способствовать углублению представлений о физических процессах в рассматриваемых устройствах.

Чтобы облегчить понимание задач, в начале каждого раздела даны краткие сведения из теории. При этом сложный и труднодоступный материал изложен более подробно. Приведенных в задачнике сведений, формул и справочных данных вполне достаточно для решения задач.

В пособие включены задачи и вопросы различной сложности – от простейших до весьма сложных и трудоемких. В каждом подразделе задачи и вопросы сгруппированы по узким темам и расположены в порядке нарастания сложности.

Решение задач помогает уяснить смысл физических явлений, закрепляет в памяти формулы, прививает навыки практического применения теоретических знаний. Эту работу студенты могут проводить не только под руководством преподавателя, но и самостоятельно (что наиболее эффективно!), поскольку по всем разделам даны основные расчетные соотношения, необходимый справочный материал, а также решения и ответы всех задач.

Пособие ориентирует студентов на активное применение средств вычислительной техники (ВТ). В принципе, все вычислительные задачи могут быть решены с помощью карандаша и бумаги. Однако по мере усложнения задач быстро возрастает количество необходимых операций, что увеличивает стоимость рабочего времени, затрачиваемого на получение результата. В этом случае использование средств ВТ дает значительный экономический эффект. Владение навыками

работы на ЭВМ не только дает возможность использования их для решения различных задач, но и вырабатывает определенный «программистский» стиль мышления, умение четко и лаконично формировать свою мысль, правильно ставить задачу и находить пути ее решения.

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», «Электропреобразовательные устройства РЭС» и др. Книга содержит большое количество схем, расчетных формул и примеров расчета и потому будет полезна в качестве справочника студентам радиотехнических специальностей при курсовом и дипломном проектировании, инженерно-техническим работникам, занимающимся разработкой и эксплуатацией радиотехнических устройств, и квалифицированным радиолюбителям.

Автор с глубокой благодарностью вспоминает своих учителей – профессоров Московского авиационного института Неймана Михаила Самойловича и Телятникова Леонида Ивановича, без которых было бы невозможным создание настоящей книги.

Автор благодарит студентов-старшекурсников за помощь при проведении расчетов и оформлении материалов книги.

Автор благодарен рецензентам за полезные советы и замечания, способствовавшие существенному улучшению книги.

Отзывы и пожелания по книге просьба направлять в издательство.

С. Гарматюк

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

*Если вы хотите научиться плавать, то смело входите в воду.
Если вы хотите научиться решать задачи – решайте их!*

Математик Поля

Прежде чем решать задачу или отвечать на вопрос, необходимо понять их сущность, смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу. В основе любого из приемов решения задач лежит аналитико-синтетический метод. Можно указать следующую схему этого метода:

- ознакомление с условием задачи. Выделение главного вопроса задачи (что неизвестно? Какова цель решения?);
- анализ содержания задачи. Исследование исходных данных (что известно? Что дано?). Внесение дополнительных (уточняющих) условий для получения однозначного ответа. При анализе очень полезно начертить схему, график или конструкцию, относящуюся к задаче, и указать на этом рисунке исходные данные, распределение токов и напряжений и т. п. Часто самый простой рисунок значительно помогает в решении задачи;
- составление плана решения;
- осуществление плана решения;
- проверка ответа (проверка размерностей, решение этой же задачи другим способом, сопоставление полученного ответа с общими принципами радиотехники, здравым смыслом и т. п.).

Эту схему решения можно выразить и другими словами:

- прочитай задачу и представь себе то, о чем в ней говорится;
- запиши задачу кратко или выполни чертеж;
- уясни, что показывает каждое число, повтори вопрос задачи;
- подумай, можно ли сразу ответить на вопрос задачи. Если нет, то почему. Что нужно узнать сначала, что потом;
- составь план решения;
- выполни решение;
- проверь решение и ответ на вопрос задачи.

Точность расчетов должна быть в разумных пределах. Очень часто студенты добиваются при вычислениях получения такой точности результата, которая совершенно не оправдывается точностью использованных данных. Это создает иллюзию точного расчета, приводит к бесполезным затратам труда и времени. «Цель расчетов – не числа, а понимание», – этот афоризм особенно справедлив для высшей школы.

Решение задач – это практическое искусство, подобное плаванию; научиться ему можно, только подражая хорошим образцам и постоянно практикуясь в самостоятельном решении задач!

Как сказал Освальд, «человек, не желающий вступать в воду, пока не научился плавать, не научится плавать».

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

А	– амплитуда колебаний
АГ	– автогенератор
АМ	– амплитудная модуляция
АПЧ	– автоматическая подстройка частоты
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
АЭ	– активный элемент
БТ	– биполярный транзистор
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ВОЛС	– волоконно-оптическая линия связи
ВЧ	– высокая частота (3...30 МГц)
ГВВ	– генератор с внешним возбуждением (усилитель)
ГП	– генераторный прибор
ГР	– граничный режим
ГУН	– генератор, управляемый напряжением
ДВ	– длинные волны
ДГ	– диод Ганна
ДНЗ	– диод с накоплением заряда
ДУ	– дифференциальное уравнение
ЗС	– замедляющая структура
ЗЧ	– звуковые частоты (16...20000 Гц)
ИМ	– импульсная модуляция
ИТ	– импульсный трансформатор
КБВ	– коэффициент бегущей волны
КУМ	– ключевой усилитель мощности
КР	– кварцевый резонатор
КПД	– коэффициент полезного действия
КСВ	– коэффициент стоячей волны
КСЦ	– корректирующе-согласующая цепь
КС	– колебательная система
ЛГР	– линия граничного режима
ЛБВ	– лампа бегущей волны
ЛОВ	– лампа обратной волны
ЛПД	– лавинно-пролетный диод
М	– индекс угловой модуляции
МРК	– многорезонаторный пролетный клистрон
НР	– недонапряженный режим
НХ	– нагрузочная характеристика
ОБ	– общая база
ОБП	– одна боковая полоса
ОВЧ	– очень высокие частоты (30...300 МГц)
ОИ	– общий исток
ОКГ	– опорный кварцевый или оптический квантовый генератор
ОМ	– однополосная модуляция
ОЛС	– оптическая линия связи
ОС	– обратная связь

ОЭ	– общий эмиттер
П	– эффективная ширина спектра ЧМ-колебания; полоса пропускания
ПАВ	– поверхностные акустические волны
ПФ	– полосовой фильтр
ПР	– перенапряженный режим
ПТ	– полевой транзистор
РВД	– реверсивно включаемый диностор
СВ	– средние волны
СВЧ	– сверхвысокие частоты (3...30 ГГц)
СКП	– средняя квадратическая погрешность (σ)
ССЧ	– синтезатор стабильных частот
СТЦ	– согласующе-трансформирующая цепь
СХ	– статическая характеристика
СУ	– согласующее устройство
СМХ	– статическая модуляционная характеристика
ТД	– туннельный диод
ТКЕ	– температурный коэффициент емкости
ТКИ	– температурный коэффициент индуктивности
ТКТ	– температурный коэффициент выходного тока АЭ
ТКЧ	– температурный коэффициент частоты
ТЛ	– трансформатор на линиях
ТУМ	– транзисторный усилитель мощности
ТЦ	– трансформирующая цепь
УВЧ	– ультравысокие частоты (300...3000 МГц); усилитель ВЧ
УМ	– угловая модуляция, усилитель мощности
УПТ	– усилитель постоянного тока
УРУ	– усилитель с распределенным усилением
УЧ	– умножитель частоты
Ф	– коэффициент filtrаций
ФАП	– фазовая автоматическая подстройка частоты
ФВЧ	– фильтр верхних частот
ФД	– фазовый детектор
ФМ	– фазовая модуляция; фазовый модулятор
ФНЧ	– фильтр низких частот
ЦС	– цепь согласования; цепь связи
ЦВС	– цифровой вычислительный синтезатор
ЧМ	– частотная модуляция
ЧРК	– частотное разделение каналов
ЧХ	– частотная характеристика
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭМС	– электромагнитная совместимость
С	– электрическая емкость
c	– скорость распространения электромагнитных волн в вакууме
$^{\circ}\text{C}$	– температура Цельсия ($^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,16$)
D	– проницаемость активного элемента; дисперсия; диаметр
d	– диаметр
e	– заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл)
E	– напряжение, напряженность электрического поля

$E'_{\text{вх}}$	– напряжение отсечки (запираения) активного элемента
f	– частота гармонических колебаний
f_s	– граничная частота транзистора по крутизне
$f_T(f_{\text{гр}})$	– граничная частота коэффициента передачи тока
g_1	– коэффициент формы тока по первой гармонике
G	– активная проводимость
h	– постоянная Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с)
i	– мгновенное значение тока
I_m	– высота импульсов выходного тока АЭ
I_n	– амплитуда тока в режиме молчания (несущей частоты)
k	– постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К)
K	– коэффициент обратной связи
$K_{\text{Н}}$	– коэффициент нелинейных искажений
$K_{\text{Р}}$	– коэффициент усиления по мощности
$K_{\text{С}}$	– коэффициент перекрытия емкости варикапа
L	– индуктивность
m	– коэффициент (глубина) амплитудной модуляции
l	– длина
N	– энергия, электрическая длина замедляющей структуры
p	– коэффициент включения колебательного контура, частотного модулятора
P_0	– мощность, потребляемая от источника питания
P_1	– колебательная мощность
$P_{\text{К}}$	– мощность, рассеиваемая коллектором
$P_{\text{П}}$	– полезная мощность генератора (в нагрузке)
Q	– добротность колебательного контура, добротность варикапа
q	– скважность
$r_{\text{нас}}$	– сопротивление насыщения ($r_{\text{нас}} = 1/S_{\text{гр}}$)
R, r	– электрическое активное сопротивление, радиус
$\text{Re}(z)$	– вещественная (резистивная) составляющая сопротивления
S	– крутизна характеристики, площадь
S_0	– дифференциальная крутизна активного элемента
S_1	– модуль средней крутизны активного элемента
$S_{\text{гр}}$	– крутизна линии граничного (критического) режима
t	– время, толщина
T	– период следования импульсов, абсолютная температура
u	– мгновенное значение напряжения
U	– электрическое напряжение
U_{Ω}	– амплитуда модулирующего напряжения
v_{Φ}	– фазовая скорость
W	– энергия электромагнитного поля
x	– реактивное сопротивление
$Z_{\text{в}}$	– волновое сопротивление
Z	– комплексное входное сопротивление
$\alpha(\theta)$	– коэффициент разложения косинусоидального импульса

β_0	– статический коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ
β	– волновое число, фазовый множитель ($\beta = \omega/v_{\Phi} = 2\pi/\lambda_{\text{д}}$), скос вершины импульса
$\gamma(\theta)$	– коэффициент разложения косинусоидального импульса
Δf	– девиация частоты; полоса пропускания
$\Delta\Phi$	– девиация фазы
δ	– относительная погрешность измерений
ε	– диэлектрическая проницаемость (относительная)
ε_a	– абсолютная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$)
ε_0	– электрическая постоянная ($10^7/(4\pi c^2) \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м)
η	– коэффициент полезного действия (КПД)
η_e	– электронный КПД
η_k	– контурный КПД
θ	– угол отсечки
$\lambda_{\text{д}}$	– длина волны в линии
μ	– магнитная проницаемость (относительная)
μ_0	– магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м)
μ_a	– абсолютная магнитная проницаемость ($\mu_a = \mu\mu_0$)
ξ	– напряженность режима, обобщенная расстройка
ρ	– характеристическое сопротивление, коэффициент стоячей волны
σ	– средняя квадратическая погрешность (СКП)
τ	– время усреднения, длительность импульсов, постоянная времени
Φ	– девиация фазы (индекс фазовой модуляции)
φ	– фазовый угол ($\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$)
$\varphi_{\text{ос}}$	– сдвиг фаз в цепи обратной связи
φ_s	– сдвиг фаз в активном элементе
$\varphi_{\text{К}}$	– контактная разность потенциалов
ω_0	– угловая резонансная частота ($\omega_0 = 2\pi f_0$)
Ω	– угловая частота модулирующего напряжения ($\Omega = 2\pi F$)

1 ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1. Статические характеристики генераторных ламп и транзисторов

Статические характеристики (СХ) АЭ представляют собой зависимости токов в цепях различных электродов от комбинаций напряжений на электродах. При изменении одного из напряжений напряжения на остальных электродах служат для СХ параметрами. Различают три вида СХ: входные, выходные и проходные. Например, для ламп входной СХ является зависимость тока управляющей сетки от напряжения на этой сетке, выходной – зависимость тока анода от напряжения на аноде, а проходной – зависимость тока анода от напряжения на управляющей сетке. СХ различных АЭ имеют существенные различия как в расположении кривых на поле характеристик, так и в значениях токов и напряжений, действующих на электродах. Однако при этом СХ ламп, БТ и ПТ имеют две общие закономерности: при малых напряжениях на электродах СХ существенно нелинейны, а при больших – почти линейны. СХ содержат исчерпывающие сведения для выбора режимов АЭ и расчета их параметров. Однако это справедливо только для диапазона рабочих частот, в котором СХ не зависят от частоты.

На рис. 1.1 приведены условные обозначения **триодов** (ГУ-66А и ГИ-7Б), а также их СХ в анодной (выходные) и анодно-сеточной системе координат (проходные) [44]. Триод ГУ-66А в непрерывном режиме работы обеспечивает колебательную мощность 100 кВт на частотах до 30 МГц, а ГИ-7Б – импульсную мощность 20 кВт на частотах до 2,6 ГГц.

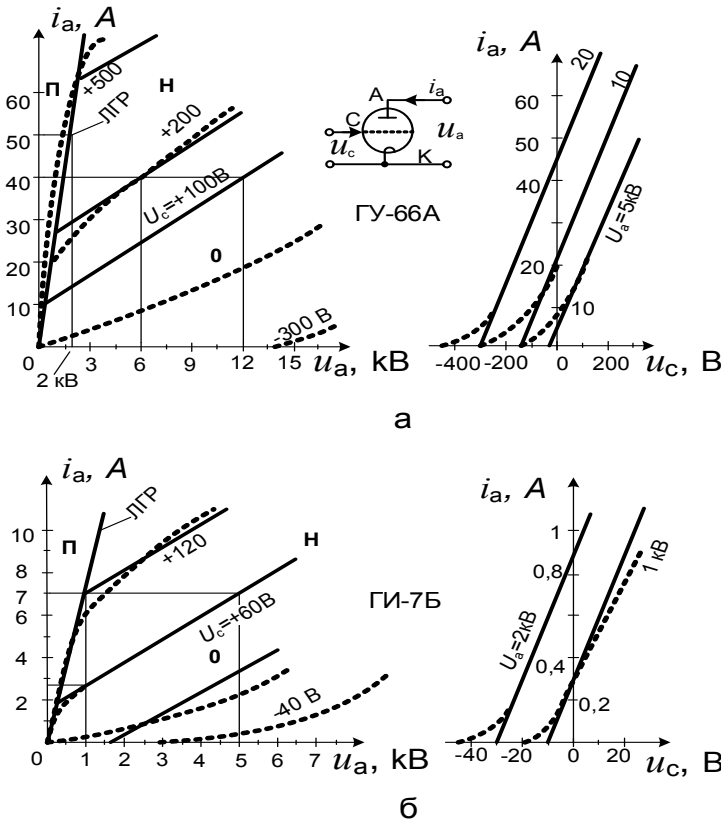


Рис. 1.1. Условные обозначения, примеры идеализации СХ и определения параметров генераторных триодов: а – непрерывного действия; б – импульсного действия

На рис. 1.2 приведены условные обозначения **тетродов** (ГС-17Б и ГУ-34Б), а также их выходные и проходные СХ [44]. Выходные СХ тетродов (рис. 1.2) сравнительно пологие, но круто обрываются при напряжениях $u_a = u_{aгр} \approx E_{c2}$. Такой вид СХ типичен для многих современных генераторных тетродов и объясняется перераспределением катодного тока между анодом и второй сеткой в области малых напряжений на аноде $0 < u_a < E_{c2}$ [72]. При снижении u_a анодный ток i_a быстро уменьшается, а ток второй сетки соответственно растет. В современных тетрадах для уменьшения тока экранирующей сетки провода этой сетки помещают как бы в тень проводов управляющей сетки. Вследствие этого в некоторых лампах, например ГУ-34Б, ток

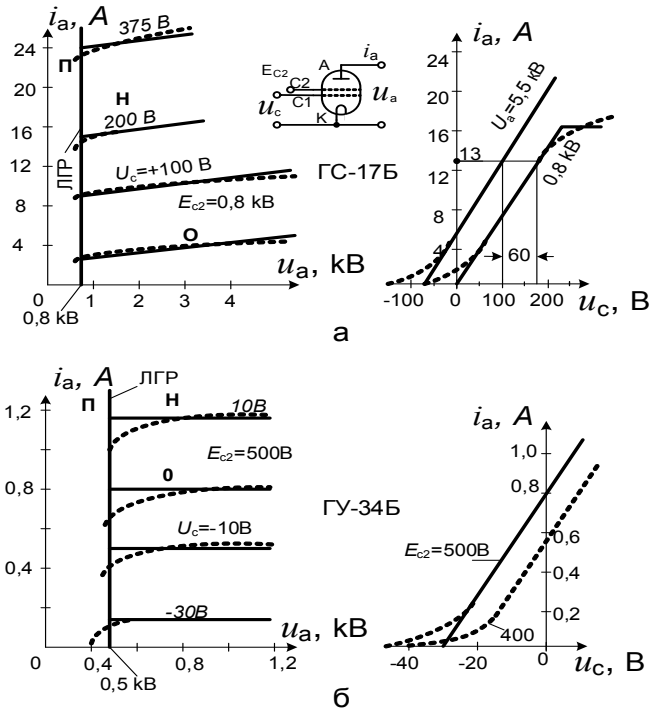


Рис. 1.2. Условные обозначения, примеры идеализации СХ и определения параметров генераторных тетродов со сдвинутой ЛГР

второй сетки при $u_a < E_{c2}$ может принимать даже отрицательные значения [72]. Металлокерамический тетрод ГС-17Б обеспечивает максимальную колебательную мощность 4,6 кВт на частотах до 1 ГГц, а ГУ-34Б – 400 Вт на частотах до 250 МГц.

На рис. 1.3 приведены условные обозначения, а также выходные и проходные СХ биполярного *n-p-n*-транзистора (2Т9102А-2) и мощного полевого МДП-транзистора с *n*-проводимостью канала (КП913А) [65, 78]. Транзистор 2Т9102А-2 обеспечивает максимальную колебательную мощность 4,5 Вт на частоте 2 ГГц, а КП913А – 120 Вт на частотах до 400 МГц.

На рис. 1.4 приведены условные обозначения, а также выходные и проходные статические характеристики металлоксидного полупроводникового мощного полевого транзистора (Metal-Oxide Semiconductor Power Field Effect Transistor) или, сокращенно, **MOSFET-транзистора** и высоковольтного ($E_{кЭ \max} = 1\ 700$ В) би-

полярного транзистора с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor) или, сокращенно, **IGBT-транзистора** [77]. Из рис. 1.1...1.4 видно, что, несмотря на различия в значениях токов и напряжений, действующих на электродах различных АЭ, их СХ имеют близкую форму.

1.2. Аппроксимация статических характеристик ламп и транзисторов

Сходство ВАХ ламп и транзисторов позволяет использовать единую форму их аппроксимации. Обычно используют простейшую аппроксимацию СХ отрезками прямых (идеализацию). Примеры идеализации СХ различных АЭ даны на рис. 1.1...1.4.

Аналитически аппроксимация характеристик выходных токов АЭ может быть записана следующим образом:

- в области отсечки, при $u_{\text{вх}} \leq E'_{\text{вх}}$

$$i_{\text{вых}}(u_{\text{вх}}) = 0;$$

- в области недонапряженного режима (области линейного усиления), при $u_{\text{вых}} \geq u_{\text{вых гр}}$

$$i_{\text{вых}} = S(u_{\text{вх}} + D u_{\text{вых}} - E_{\text{вх0}});$$

- в области перенапряженного режима (области насыщения), при $u_{\text{вх}} \geq u_{\text{вх гр}}, u_{\text{вых}} \leq u_{\text{вых гр}}$

$$i_{\text{вых}} = S_{\text{гр}} u_{\text{вых}},$$

здесь $u_{\text{вх}}$ и $u_{\text{вых}}$ – мгновенные значения входного и выходного напряжений на электродах АЭ; $S = \Delta i_{\text{вых}} / \Delta u_{\text{вх}}$, при $u_{\text{вых}} = \text{const}$ – крутизна проходной характеристики $i_{\text{вых}}(u_{\text{вх}})$ активного элемента; $S_{\text{гр}} = i_{\text{вых}} / u_{\text{вых гр}} = 1 / r_{\text{нас}}$ – крутизна линии граничного (критического) режима; $r_{\text{нас}} = 1 / S_{\text{гр}}$ – сопротивление насыщения; $E'_{\text{вх}} = E_{\text{вх0}} - D u_{\text{вых}}$ – напряжение отсечки, т. е. напряжение на входном электроде, при котором имеет место отсечка выходного тока; $E_{\text{вх0}}$ – напряжение приведения по управляющему электроду, определяющее напряжение отсечки (запирания) $E'_{\text{вх}}$ при $u_{\text{вых}} = 0$. При $D = 0$ напряжение приведения равно напряжению отсечки $E'_{\text{вх}}$; $D = \Delta u_{\text{вх}} / \Delta u_{\text{вых}}$ при $i_{\text{вых}} = \text{const}$ – проницаемость АЭ. Для триодов $D = 0,01...0,1$; для пентодов и лучевых тетродов $D = 0,005...0,01$, а для транзисторов её обычно принимают равной нулю.