

Содержание

Предисловие	14
Благодарности и адреса для переписки.....	22

▼ Глава 1

Генерация ВЧ- и СВЧ-синусоидальных и модулированных сигналов	23
1.1. Критерии скорости протекания процессов.....	23
1.2. Синусоидальные и близкие к ним сигналы и их свойства	25
1.2.1. Колебательные системы, создающие синусоидальные колебания.....	25
1.2.2. Математическое представление синусоидальных сигналов.....	25
1.2.3. Стационарные и модулированные синусоидальные сигналы.....	27
1.2.4. Мощность синусоидальных сигналов.....	28
1.2.5. Параметры переменных напряжений и токов	29
1.2.6. Колебания в нелинейных системах	30
1.2.7. Типы источников синусоидальных сигналов.....	32
1.3. Основы построения высокочастотных генераторов синусоидальных сигналов	33
1.3.1. Обобщенная схема генератора с обратной связью	33
1.3.2. Стабилизация амплитуды у генераторов синусоидальных сигналов	34
1.3.3. Методы и виды модуляции синусоидальных сигналов	35
1.4. Основные типы генераторов высокочастотных синусоидальных сигналов	37
1.4.1. RC-генераторы.....	37

1.4.2. LC-генераторы синусоидального напряжения и их математическое моделирование	38
1.4.3. Некоторые практические схемы транзисторных LC-генераторов	40
1.4.4. LC-генераторы на негатронах	43
1.4.5. LC-генераторы синусоидальных сигналов на интегральных микросхемах	45
1.4.6. Кварцевые резонаторы и генераторы	45
1.4.7. Пути улучшения параметров генераторов синусоидальных сигналов	51
1.4.8. Генераторы на основе синтезаторов частоты	54
1.5. Серийные аналоговые ВЧ-генераторы синусоидальных сигналов	56
1.5.1. Измерительные аналоговые генераторы ВЧ-синусоидальных сигналов	56
1.5.2. Измерительные аналоговые генераторы СВЧ-синусоидальных сигналов	60
1.5.3. Измерительные СВЧ-генераторы с цифровым синтезатором	61
1.5.4. Аналоговые генераторы фирмы Agilent Technologies	62
1.5.5. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы RONDE&SCHWARTZ	67
1.6. Генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов	72
1.6.1. Функциональные схемы генераторов сигналов с прямым цифровым синтезом сигналов	72
1.6.2. Шум синтезированного сигнала	74
1.7. Серийные генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов	77
1.7.1. Простые генераторы с прямым цифровым синтезом	77
1.7.2. Обзор генераторов сигналов фирмы Tektronix	78
1.7.3. Генераторы сигналов произвольной формы Tektronix AFG 3000	79
1.7.4. Создание сигнала с кодоимпульсной модуляцией	86
1.7.5. Монолитные микросхемы для кодоимпульсной модуляции/демодуляции	91
1.8. Векторные генераторы синусоидальных сигналов	94
1.8.1. Векторные генераторы фирмы R&S	94

1.8.2. Векторные генераторы фирмы Keithley	96
1.9. Новое поколение микросхем СВЧ-генераторов синусоидального сигнала компании Hittite	99
1.9.1. Микросхемы управляемых напряжением генераторов (VCO) с встроенным делителем частоты	99
1.9.2. Микросхемы VCO со встроенным буфером	102
1.9.3. Микросхемы VCO с двумя радиочастотными выходами.....	104
1.9.4. Широкополосные (Wideband) VCO	105
1.9.5. Монолитная микросхема генератора типа PLO	107
1.10. Монолитные микросхемы синтезаторов частоты компании Hittite.....	109
1.10.1. Монолитные микросхемы синтезаторов без VCO	109
1.10.2. Монолитные микросхемы PLL СВЧ-синтезаторов	116
1.10.3. Трехдиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов	119
1.10.4. Широкодиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов	121
1.10.5. Микросхемы НМС983/НМС983 для построения сверхширокополосных синтезаторов.....	124
1.10.6. Монолитные микросхемы широкодиапазонных синтезаторов НМС701/702/703	128
1.10.7. Программное обеспечение монолитных микросхем синтезаторов	132

▼ Глава 2

Генераторы импульсов и сложных сигналов.....	135
2.1. Параметры и свойства импульсных сигналов	135
2.1.1. Типы импульсных сигналов	135
2.1.2. Параметры импульсных сигналов	136
2.1.3. Спектр импульсных сигналов	138
2.2. Основные методы и устройства генерации импульсных сигналов	142
2.2.1. Основные методы генерации импульсных сигналов.....	142
2.2.2. Импульсные схемы на биполярных и полевых транзисторах	143

2.2.3. Генераторы импульсов на интегральных микросхемах общего применения	144
2.3. Импульсные генераторы на интегральном таймере	144
2.3.1. Наследники классики – таймера 555	145
2.3.2. Автоколебательный и ждущий релаксаторы на интегральном таймере.....	149
2.3.3. Типовые импульсные схемы на интегральных таймерах класса 555	152
2.3.4. Характеристики прецизионных интегральных таймеров	157
2.3.5. Сдвоенные интегральные таймеры класса 556	158
2.3.6. Одиночные интегральные таймеры на CMOS-транзисторах	159
2.3.7. Новейшие LinCMOS-таймеры TLC551 и TLC555	160
2.4. Импульсные устройства на негатронах	164
2.4.1. Общая оценка	164
2.4.2. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах	165
2.4.3. Появление лавинных транзисторов.....	168
2.4.4. Лавинно-инжекционные транзисторы	171
2.4.5. «Аномально быстрое» включение лавинного транзистора	175
2.4.6. Лавинные транзисторы с ограниченной областью объемного заряда (АТОООЗ).....	181
2.4.7. Моделирование релаксационных генераторов на лавинных транзисторах.....	183
2.4.8. Серийные лавинные транзисторы и их применение	184
2.4.9. Интегральное исполнение схем на лавинных транзисторах	186
2.5. Измерительные генераторы импульсов	187
2.5.1. Функциональная схема аналогового импульсного генератора	187
2.5.2. Серийные генераторы прямоугольных импульсов	188
2.6. Функциональные генераторы	195
2.6.1. Основные типы функциональных генераторов.....	195
2.6.2. Аналоговые функциональные генераторы	196
2.6.3. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током	198
2.6.4. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного	201

2.6.5. Микросхемы аналоговых функциональных генераторов	202
2.6.6. Серийные аналоговые функциональные генераторы	208
2.7. Цифровые функциональные генераторы	216
2.7.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов	216
2.7.2. Простые цифровые функциональные генераторы	218
2.8. Цифровые генераторы сигналов произвольной формы	220
2.8.1. Назначение и особенности генераторов сигналов произвольной формы	220
2.8.2. Генераторы сигналов произвольной формы	221
2.9. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000	227
2.9.1. Органы управления генератора AFG3000	227
2.9.2. Технические характеристики генераторов AFG3000	229
2.9.3. Работа с генератором AFG3000	229
2.9.4. Основные возможности генераторов AFG3101	232
2.10. Генераторы серии DG5000 фирмы RIGOL	237
2.10.1. Основные возможности генераторов DG5000	237
2.10.2. Возможности генерации сигналов с кодоимпульсной модуляцией	240
2.10.3. DG5000 в роли генератора качающейся частоты	242
2.11. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG	243
2.11.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG	243
2.11.2. Генераторы серии AWG7000	244
2.11.3. Генераторы серии AWG5000	246
2.12. Генераторы сигналов сложной формы (паттернов)	248
2.12.1. Функциональная схема генератора паттернов	248
2.12.2. Генераторы цифровых сигналов фирмы Tektronix	249
2.12.3. Генератор импульсов/паттернов серии 3400 фирмы Keithley	252

▼ Глава 3

Методы генерации и генераторы субнано- и пикосекундных импульсов	253
3.1. Методы генерации перепадов и импульсов сверхмалой длительности	253

3.1.1. Основные методы генерации импульсов сверхмалой длительности.....	253
3.1.2. Релаксаторы на водородных тиратронах и крайтронах	258
3.1.3. Генераторы коротких импульсов с разрядом формирующего двухполюсника или линии	260
3.1.4. Формирование субнаносекундных перепадов нелинейными линиями передачи с ударными волнами	263
3.1.5. Генераторы коротких импульсов на основе применения ударных волн в линиях передачи	265
3.2. Формирователи импульсов субнаносекундной длительности	268
3.2.1. Диодные и другие ограничители	268
3.2.2. Особенности сверхскоростных интегральных усилителей.....	269
3.2.3. Характеристики скоростных интегральных усилителей	270
3.2.4. Высокоскоростные интегральные компараторы	278
3.2.5. Сверхскоростные пикосекундные микросхемы корпорации Hittite Microwave	280
3.3. Регенеративные формирователи импульсов на туннельных диодах.....	285
3.3.1. Основная схема на туннельном диоде (ТД)	285
3.3.2. Моделирование генератора синусоидального сигнала на ТД.....	286
3.3.3. Моделирование ждущего релаксационного генератора на ТД.....	289
3.3.4. Моделирование триггера на ТД с отдельным запуском.....	289
3.3.5. Пример применения ТД для получения перепадов с длительностью 50 пс.....	292
3.4. Формирователи коротких перепадов и импульсов на диодах с накоплением заряда	296
3.4.1. Физика работы диода при переключении.....	296
3.4.2. Обостритель переднего фронта импульсов на ДНЗ.....	298
3.4.3. Генератор с формирователем прямоугольных импульсов на ДНЗ.....	299
3.5. Генераторы коротких перепадов и импульсов на лавинных транзисторах.....	301
3.5.1. Генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами на лавинных транзисторах.....	301

3.5.2. Генератор прямоугольных импульсов с $t_{\phi} \approx 0,1$ нс	306
3.5.3. Генератор импульсов тока с амплитудой 25 А и длительностью 1,5 нс	308
3.5.4. Генераторы прямоугольных импульсов с разрядной линией	310
3.6. Генераторы коротких перепадов и импульсов на лавинных и полевых транзисторах	316
3.6.1. Формирователи коротких импульсов на лавинных и мощных СВЧ-биполярных транзисторах	316
3.6.2. Формирователи импульсов на двухполюснике с лавинным и мощным СВЧ МДП-транзисторами	320
3.6.3. Формирователи импульсов с запуском мощного СВЧ GaAs полевого транзистора от лавинного	323
3.6.4. Высокочастотный генератор импульсов	328
3.6.5. Генераторы импульсов на GaAs полевом транзисторе с запуском от GaAs-микросхемы	329
3.7. Генераторы коротких импульсов на новых полупроводниковых приборах	331
3.7.1. Генераторы коротких импульсов на лавинных S-диодах	331
3.7.2. Генераторы сверхкоротких импульсов на дрейфовых диодах и транзисторах с резким восстановлением	334
3.7.3. Генераторы импульсов на фотонно-инжекционных импульсных коммутаторах	337
3.8. Серийные генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами	339
3.8.1. Генераторы импульсов – калибраторы осциллографов	339
3.8.2. Генераторы пикосекундных импульсов серии 4000 фирмы Picosecond Pulse Lab	342
3.8.3. Генераторы импульсов серии GFT	347
3.8.4. Генераторы сверхкоротких импульсов серий PF и PG	347
3.8.5. Высоковольтные импульсные модули HVS фирмы ALPHALAS	352
3.8.6. Нано- и субнаносекундная техника фирмы AVTECH	353
3.8.7. Генераторы импульсов для управления высоковольтными ячейками Поккельса	356
3.8.8. Оптико-электронные компоненты фирмы Leyshop	359

▼ Глава 4

Методы и приборы аналоговой электронной осциллографии.....	361
4.1. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ).....	361
4.1.1. Устройство осциллографической электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).....	361
4.1.2. Графическая скорость луча в ЭЛТ.....	364
4.1.3. Время установления отклоняющей системы.....	365
4.1.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ.....	366
4.1.5. Осциллографические трубки специального назначения.....	369
4.2. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа.....	372
4.2.1. Основные типы электронных осциллографов.....	372
4.2.2. Принцип действия аналогового осциллографа.....	372
4.2.3. Структурная схема аналогового осциллографа.....	373
4.2.4. Требования к усилителям осциллографа.....	376
4.2.5. Принципы построения генераторов развертки.....	383
4.2.6. Прочие узлы аналогового осциллографа.....	387
4.3. Аналоговые осциллографы.....	388
4.3.1. Сверхскоростные осциллографы без усилителей.....	388
4.3.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов.....	389
4.3.3. Современные аналоговые сервисные осциллографы.....	391
4.3.4. Отечественные универсальные аналоговые осциллографы.....	393
4.3.5. Зарубежные аналоговые универсальные осциллографы.....	397
4.3.6. Скоростные аналоговые осциллографы.....	400
4.3.7. Скоростные осциллографы АКТАКОМ-IWATSU.....	406
4.4. Работа с аналоговым осциллографом.....	411
4.4.1. Подготовка осциллографа к работе.....	411
4.4.2. Выбор режимов работы усилителей канала Y.....	413
4.4.3. Калибровка чувствительности.....	414
4.4.4. Учет влияния входной цепи осциллографа.....	416
4.4.5. Применение пробников в виде компенсированных делителей напряжения.....	418
4.4.6. Установка точной компенсации делителя.....	421

4.4.7. Работа с разверткой и ее синхронизация	423
4.5. Основные осциллографические измерения сигналов.....	425
4.5.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала.....	425
4.5.2. Измерение сдвига фазы сигналов по их временному сдвигу	428
4.5.3. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу.....	429
4.5.4. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу.....	430
4.5.5. Осциллограф в роли характериографа	431
4.5.6. Курсорные измерения	433
4.6. Наблюдение высокоскоростных процессов аналоговыми осциллографами.....	435
4.6.1. Проверка переходной характеристики осциллографа	435
4.6.2. Проверка частотной характеристики осциллографа.....	437
4.6.3. Подключение осциллографа к источникам сигналов	438
4.6.4. Влияние провода заземления пробника	443
4.6.5. Время нарастания системы пробник–осциллограф.....	445
4.6.6. Применение активных пробников	447
4.6.7. Осциллографирование высоковольтных сигналов.....	449
4.6.8. Измерение токовых сигналов.....	451
4.6.9. Измерения в режиме согласования линий передачи сигнала	453

▼ Глава 5

Скоростные цифровые и стробоскопические осциллографы	456
5.1. Цифровое представление аналоговой информации.....	456
5.1.1. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов.....	456
5.1.2. Дискретизация сигнала – равномерная и неравномерная.....	458
5.1.3. Функциональные схемы цифровых осциллографов	461
5.1.4. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов.....	464
5.1.5. Специальные параметры цифровых осциллографов.....	467
5.1.6. Об интерполяции в цифровых осциллографах.....	469
5.1.7. Имитация аналогового послесвечения (технология цифрового фосфора)	470

5.1.8. Автоматические измерения	475
5.2. Цифровые осциллографы в роли анализаторов спектра	478
5.2.1. Дискретный спектральный анализ.....	478
5.2.2. Оконное быстрое преобразование Фурье и типы окон	479
5.2.3. Реализация спектрального анализа на цифровых осциллографах	481
5.3. Принципы построения стробоскопических осциллографов.....	486
5.3.1. Принцип действия стробоскопического осциллографа.....	486
5.3.2. Генераторы стробирующих импульсов	488
5.3.3. Устройства выборки сигналов	489
5.4. Серийные цифровые осциллографы	491
5.4.1. Проблема выбора аналого-цифровых преобразователей	491
5.4.2. Цифровые осциллографы с полосой частот до 1 ГГц	495
5.4.3. ЦЗО фирмы Tektronix с закрытой архитектурой	502
5.4.4. ЦЗО фирмы Tektronix на базе открытой платформы ПК	513
5.4.5. ЦЗО фирмы LeCroy	522
5.4.6. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies.....	530
5.5. Осциллографы смешанных сигналов.....	540
5.5.1. Назначение осциллографов смешанных сигналов	540
5.5.2. Осциллографы смешанных сигналов фирмы Agilent Technologies.....	540
5.5.3. Осциллографы смешанных сигналов серии MSO4000 фирмы Tektronix.....	541
5.5.4. Осциллографы смешанных сигналов фирмы RIGOL	544
5.5.5. Применение осциллографа WavePro фирмы LeCroy с опцией логического анализатора	548
5.6. Стробоскопические осциллографы	550
5.6.1. Отечественные стробоскопические осциллографы.....	550
5.6.2. Стробоскопический осциллограф – приставка к ПК С1-24.....	551
5.6.3. Стробоскопический осциллограф TDS8000B фирмы Tektronix.....	555
5.6.4. Стробоскопический осциллограф 86100C DCA-J фирмы Agilent.....	556
5.6.5. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц.....	557

5.7. Особенности работы со скоростными цифровыми осциллографами.....	561
5.7.1. Пробники с коррекцией частотной характеристики	561
5.7.2. Эволюция конструкции осциллографических пробников	564
5.7.3. Пробники с оптической развязкой	566
5.7.4. Токовые пробники для цифровых осциллографов.....	567
5.7.5. Выбор входного сопротивления у осциллографов	569
5.7.6. Назначение современных активных пробников	572
5.7.7. Широкополосные активные пробники.....	574
5.7.8. Дифференциальные пробники для ЦЗО.....	576
5.7.9. Конфигурация измерительной головки пробников.....	578
5.7.10. Пробники для анализаторов сигналов.....	580

Предисловие



К быстропротекающим процессам в электронике, микро- и нанотехнологиях, в ядерной физике, оптоэлектронике, технике скоростной связи, в измерительных приборах и в других областях науки и техники принято относить процессы, протекающие в области наносекундных, пикосекундных и даже фемтосекундных диапазонов времен. Во время Второй мировой войны и вскоре после нее появились первые уникальные методы генерации коротких импульсов и приборы для исследования быстропротекающих процессов в радиолокации, в ядерной и термоядерной технике, распространении радиоволн СВЧ-диапазона, взаимодействии элементарных частиц между собой и средой и т. д. [1]. Затем появились импульсные лазеры, высокоскоростная электронно-оптическая техника и мощная и сверхмощная импульсная энергетика и электроника [2].

В те годы сверхскоростные методы и приборы относились к уникальным разработкам, лежащим в сфере решения первостепенных задач военно-промышленного комплекса (ВПК) СССР. Они вносили большой вклад в решение важной проблемы повышения обороноспособности страны. На эти, часто закрытые, разработки государство не жалело средств, и они проводились интенсивно и на уровне лучших мировых достижений науки и техники. Работы велись практически во всех республиках СССР. Был создан огромный парк измерительных приборов (электронных осциллографов, генераторов сигналов различной формы, измерителей различных электрических и иных величин и др.) [3]. Однако уже тогда возник отрыв многих таких разработок от мирового уровня, связанный с пресловутым «железным занавесом» и ограниченным финансированием.

В начале 90-х годов «железный занавес» пал, и сверхскоростные электронные и оптические приборы и устройства перестали быть уникальными изделиями. Они широко применяются во многих об-

ластях современной науки и техники [4–9]. Достаточно отметить, что микропроцессоры массовых персональных компьютеров работают с тактовой частотой до 3–4 ГГц, что еще с десятков лет тому назад казалось фантастикой. Изделия сверхмассового производства – транзисторы – ныне способны работать с частотами порядка терагерц (1 ТГц = 10^{12} Гц), при этом число их на кристалле сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) достигает сотен миллионов и даже нескольких миллиардов штук. А сотовые и световолоконные скоростные системы связи стали массовыми и общедоступными.

Появились новые сферы применения сверхскоростных электронных устройств – видеоимпульсная и оптическая (лазерная) локация, широкополосные системы связи, подпочвенные локаторы (георадары) для наблюдения объектов под землей и за стенами зданий, ультразвуковые измерители уровня разных сред и др. Возникла нано- и субнаносекундная импульсная техника, в том числе сверхвысоких мощностей [2]. Особенно большой прогресс был достигнут в измерительной технике. Были созданы электронные цифровые осциллографы с частотами дискретизации сигналов до 100–500 ГГц [9] и генераторы импульсов с перепадами субнаносекундной (менее $1 \cdot 10^{-9}$ с) и даже пикосекундной (до $1 \cdot 10^{-12}$ с) длительности. По-прежнему в применении таких устройств лидируют ядерная физика, лазерная техника и техника физического эксперимента. В начале освоения пикосекундная, даже фемтосекундная импульсная техника. Растет мощность используемых импульсов – уже есть разработки импульсных генераторов, мощность которых в коротком импульсе сравнима с мощностью ядерного взрыва.

В период распада СССР отечественные разработки в области генерации сигналов, особенно импульсных, до того проводимые с большим размахом, практически прекратились. Дошло до того, что импульсная техника исчезла из перечня специальностей ВАК. Практически распалась промышленность, выпускающая приборы для исследования высокоскоростных устройств и процессов. Этим немедленно воспользовались наши западные соперники – на наш рынок хлынул поток зарубежных разработок таких устройств, которые не так давно мы разрабатывали вполне самостоятельно и которые не уступали зарубежному уровню. Это отражено в многочисленной монографической, учебной и справочной литературе тех лет [21–31]. Многие западные разработки в этой области были выполнены нашими специалистами, вынужденными иммигрировать в США и западные страны.

Главной причиной указанного отставания у нас стало отсутствие современной элементной базы, базирующейся на достижениях микроэлектроники, и разрушение производственных связей между странами – бывшими республиками СССР. Достаточно отметить, что большая часть советских скоростных осциллографов и генераторов коротких импульсов создавалась и выпускалась в Вильнюсском НИИ радиоизмерительных приборов и Минском приборостроительном институте, множество микросхем выпускалось в Киевском НПО «Кристалл» и т. д. В период распада СССР все эти предприятия стали зарубежными фирмами, их взаимодействие было разлажено, а некоторые, процветающие во времена СССР фирмы, просто исчезли.

Автор этой монографии, заведая более четверти века кафедрой промышленной электроники Смоленского филиала МЭИ, еще с конца 60-х годов занимался проблематикой импульсных сверхскоростных устройств, начиная с исследования уникальных возможностей биполярных транзисторов в лавинном режиме их работы. В 70-е годы были разработаны и всесторонне изучены первые советские германиевые специальные лавинные транзисторы серии ГТ338 – разработчик Ю. А. Кузнецов из НИИ «Пульсар». Мы активно сотрудничали с этой организацией и Киевским НПО «Кристалл», освоившим выпуск данных приборов в СССР [26–29, 258]. В то время были заложены фундаментальные основы физики и схемотехники лавинных полупроводниковых приборов.

В 1973 г. вышла монография [68] – первая в мире по данному направлению и отмеченная в энциклопедии Википедия по тематике лавинных транзисторов [69]. В 2008 и 2012 г. вышла новая, существенно обновленная и дополненная монография по лавинным транзисторам и тиристорам, их теории и применению [70].

Позже такое сотрудничество было налажено с разработчиками мощных СВЧ МДП-транзисторов и GaAs полевых транзисторов – В. В. Бачуриным и В. Я. Ваксембургом. В 80–90-х гг. нами впервые были показаны уникальные импульсные свойства мощных полевых транзисторов [33, 34, 259], которые позже были положены в основу нового поколения ключевых мощных (силовых) полевых транзисторов. Тогда же нами была предложена структура мощного биполярного транзистора с полевым управлением (авт. свид. СССР № 757061 на «Полупроводниковый прибор» от 21 апреля 1980 г.). Ныне подобные биполярные транзисторы с полевым управлением (IGBT) широко используются в силовой электронике и автоматике [301, 302].

Совместное применение мощных МДП- и GaAs полевых транзисторов с лавинными транзисторами [42–69, 73] открыло новые возможности в построении генераторов импульсов нано- и даже пикосекундного диапазона времен нарастания и спада. По заказу НПО «Элас» Зеленоградского центра микроэлектроники была выполнена крупная тема по проблеме создания высоковольтных и сильноточных нано- и субнаносекундных устройств. Там же автор в 1980 г. защитил докторскую диссертацию. Результаты наших совместных исследований тех лет нашли отражение в ряде книг, в сотнях статей в ведущих научных журналах и в десятках изобретений (часть их упомянута в списке литературы данной книги). Эти работы легли в основу физики работы и схемотехники сверхскоростных электронных устройств.

В ходе этих исследований был обнаружен и описан в [68, 70, 72–102] комплекс физических явлений, позволивший в деталях объяснить уникальные возможности биполярных транзисторов в лавинном режиме работы, в частности сочетание предельно высокого быстродействия с предельными импульсными токами и напряжениями. Ныне это нашло практическое применение как в создании новейших высоковольтных кремниевых лавинных транзисторов фирмой Zetex [251], так и в разработке целого ряда уникальных серийных генераторов мощных коротких импульсов. Они находятся лишь в начале своего развития.

Между тем потребность в стабильных и модулируемых различными видами модуляции сигналов, как синусоидальных, так и импульсных, в последние годы многократно возросла в связи с развитием новых областей их применения – электронно-оптических приборов, видеоимпульсных и ультразвуковых локаторов, гео- и подповерхностных радаров [104–120] и разнообразных систем цифровой связи, в частности мобильных и сотовых [224–228].

Еще во времена СССР была ясна необходимость в универсальных генераторах сигналов типовых форм – синусоидальной, прямоугольной, пилообразной и треугольной. Это привело к развитию аналоговых функциональных генераторов [21–24]. Их частотный диапазон достиг десятков мегагерц, габариты и масса приборов уменьшились в несколько раз, а функциональные возможности заметно возросли.

Начиная с разработок генераторов телевизионных сигналов, появилась необходимость в генерации сигналов намного более сложной формы, чем у обычных импульсных генераторов и функциональных генераторов. К тому же по диапазону частот и стабильности частоты аналоговые функциональные генераторы оказались не способными

удовлетворить жестким требованиям к современным системам цифровой связи, особенно многоканальным, таким как системы мобильной и сотовой связи. Острым стал вопрос об осуществимости регулировки всех параметров сигналов генераторов в широких пределах и с высокой точностью электронными методами и управления генераторами от персональных компьютеров (ПК).

В связи с этим появились новейшие разработки генераторов сигналов на основе прямого цифрового синтеза частот и форм сигналов [44–57, 274]. В таких генераторах применение аналоговой элементной базы резко ограничено, и приборы строятся на основе как стандартных, так и специализированных сверхскоростных цифровых микросхем, аналого-цифровых (АЦП) и цифроаналоговых (ЦАП) преобразователей. Это обеспечивает легкую и естественную стыковку таких генераторов с другими цифровыми приборами и современными персональными и промышленными компьютерами и резкое повышение точности задания всех параметров. И открывает широкие возможности их применения в испытании и отладке различных электронных и радиотехнических систем и устройств с применением компьютеризированных измерительных средств.

Бурное развитие получили цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО) и стробоскопические осциллографы, полоса частот которых достигла 100 ГГц даже у серийных приборов [5–8, 260]. Появились новые осциллографические приборы для анализа сигналов, спектров и источников сигналов, импульсные и оптические рефлектометры и мини-рефлектометры. Все они, и даже новейшие электронно-оптические стробоскопические осциллографы на основе фемтосекундных лазеров, описаны в данной книге, как и специальные приборы для исследования высокоскоростных фотодиодов, полупроводниковых лазеров и лазерных светоизлучающих решеток и скоростных фотодиодов.

В книге впервые подробно описаны новые приборы для генерации мощных и сверхмощных нано- и пикосекундных импульсов и техника управления лазерным излучением. При этом, в отличие от монографии [2], описывающей в основном уникальные разработки, в данной книге рассмотрены устройства на новейших полупроводниковых приборах, многие из которых уже освоены в серийном производстве. Это описание сопровождается наглядной иллюстрацией работы с этими, порою мало известными нашему читателю, самыми современными приборами. В частности, приведено много примеров такой работы, сопровождаемых осциллограммами, спектрограммами,

диаграммами работы и другими иллюстративными и справочными материалами.

Чтобы вести исследования в области изучения быстропротекающих процессов и измерения их параметров, автор был вынужден создать современную личную лабораторию, оснащенную новейшими зарубежными и некоторыми отечественными приборами, – рис. 0.1. В лабораторию вошли новейшие цифровые осциллографы и генератор произвольных функций корпорации Tektronix, современный цифровой анализатор спектра с трекинг-генератором, высокоточный мультиметр компании Keithley, советский стробоскопический осциллограф С1-91/4 с полосой до 18 ГГц, генераторы коротких импульсов и другие приборы.



Рис. 0.1. Научная лаборатория автора данной книги

Роль измерительной техники в книге отражена особо. Современные цифровые измерительные приборы (генераторы сигналов, осциллографы, анализаторы спектра, сигналов и логики), с одной стороны, являются основными средствами для исследования и тестирования скоростных устройств и систем самого различного назначения, а с другой – типичными объектами применения сверхскоростных процессов. В них широко применяются активные приборы и

специализированные интегральные микросхемы на основе арсенида галлия, широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Они лидируют по скоростям и частотам переключения, достигающим десятков и даже сотен гигагерц.

Современная, особенно массовая, измерительная техника описана в ряде книг и обзоров автора [3–7, 274–305]. Естественно, она отражена и в данной книге. Но в последней особое внимание уделено самым новейшим разработкам сверхскоростных приборов не только ведущих фирм мира (Agilent Technologies, Tektronix, LeCroy), но и многих других широко известных фирм мирового значения (IWATSU, R&S, Keithley, RIGOL, Yokogawa и др.). Большинство из этих разработок не описаны в нашей книжной литературе. Так, впервые описаны новые классы измерительных приборов – генераторы сверхкоротких импульсов (фирм Picosecond Pulse Lab, ALPHALAS, AVTECH и др.), цифровые осциллографы-регистраторы и анализаторы спектра оптического излучения фирмы Yokogawa, импульсные и оптические рефлектометры ряда фирм и др. Значительное внимание уделено программным средствам для современных измерительных приборов и стыковке их с персональными компьютерами (ПК).

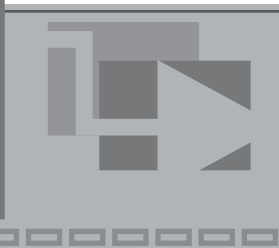
Следует отметить, что в наше время литературы, посвященной описанию аппаратных средств, выпускается намного меньше, чем литературы по программным средствам, например по моделированию различных устройств и систем. Это вполне понятно – стоимость разработки, исследования и тестирования аппаратных средств намного выше, чем стоимость программных средств. Однако читатель этой книги наверняка знает, что разработка любой современной системы или устройства не может считаться завершенной без их реализации в «железе», то есть без создания соответствующих аппаратных средств. И это делает книги, подобные данной, особенно своевременными и актуальными.

В книгу вошли не только обзорные материалы мировых достижений в области сверхскоростной твердотельной электроники, но и лучшие материалы исследований научной школы автора прошлых лет. Широко использованы и многочисленные материалы обзорных статей автора в новейших журналах «Компоненты и технологии», «Контрольно-измерительные приборы и системы», «Схемотехника», «Силовая электроника», «Беспроводные технологии», «Полупроводниковая светотехника», «Ремонт и сервис» и др. Многие материалы взяты из фирменных описаний приборов, размещенных в Интернете. Значительное внимание уделено практическим аспектам построения

сверхскоростных электронных устройств, которые нередко относятся не столько к теории и обычной практике эксперимента, сколько к «черной магии»! Все, кто реально занимался созданием сверхскоростных устройств, знают, что кавычки в этом определении часто неуместны.

Монография рассчитана на самые широкие круги специалистов в различных областях науки и техники, применяющих средства сверхскоростной твердотельной электроники и измерительной техники в своих разработках, научных работников и инженеров, студентов и преподавателей технических университетов и вузов.

Благодарности и адреса для переписки



Автор благодарит генерального директора фирмы Эликс А. А. Афонского за помощь в практическом знакомстве с некоторыми из описанных в этой книге уникальными приборами и за информацию об их характеристиках. Он с признательностью вспоминает о годах плодотворного сотрудничества с рядом представителей электронной промышленности СССР – Ю. Р. Носовым, Ю. А. Кузнецовым, В. В. Бачуриным, В. Я. Ваксембургом и др. Он также признателен многим своим коллегам, поддержавшим работу над этой книгой в наше очень непростое и противоречивое время.

Своими впечатлениями о книге читатель может поделиться с автором, написав ему по адресу электронной почты (vpdyak@yandex.ru). О своих соображениях читатель может также сообщить по адресу издательства, выпустившего эту книгу.

Генерация ВЧ- и СВЧ-синусоидальных и модулированных сигналов



Синусоидальные колебания – одни из самых распространенных в природе. Диапазон их частот простирается от тысячных долей герца до тысяч гигагерц. В этой главе обзорно описана техника генерации высокочастотных синусоидальных сигналов, которые находят широкое применение в исследовании и тестировании разнообразных электронных устройств. Наряду с классическими вариантами таких устройств (*LC*- и кварцевых генераторов) описаны новые методы генерации сигналов путем частотного синтеза и прямого цифрового синтеза синусоидальных колебаний с высочайшей стабильностью частоты и высоким ее разрешением. Приведены данные по некоторым типам серийных генераторов синусоидальных сигналов и генераторам качающейся частоты.

1.1. Критерии скорости протекания процессов

Пусть некоторый процесс характеризуется временной зависимостью параметра u – $u(t)$. В подавляющем большинстве случаев в данной книге $u(t)$ это изменение во времени напряжения. Тогда скорость изменения параметра u во времени в данный момент времени t определяется как

$$k_V = \frac{du(t)}{dt}. \quad (1.1)$$

Для синусоидального напряжения:

$$k_V = \frac{du(t)}{dt} = \frac{d(A \cdot \sin(2\pi ft))}{dt} = 2A\pi f \cos(t). \quad (1.2)$$

Она пропорциональна амплитуде A и частоте f синусоидального напряжения. Максимальная скорость изменения наблюдается при $t = 0$ (и $2\pi n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$):

$$k_{U_{\max}} = 2A\pi f. \quad (1.3)$$

Например, при $A = 10$ В и $f = 1$ ГГц (10^9 Гц) максимальная крутизна синусоидального напряжения составит $6,28 \cdot 10^{10}$ В/с. Заметим, что в ряде применений нано- и субнаносекундной импульсной техники крутизна изменения напряжения на фронтах импульсов достигает значений $10^{11} - 10^{12}$ В/с и даже выше.

Для перепадов или фронтов импульсов крутизну можно оценить по формуле

$$k_U \approx A/t_\phi,$$

где A – амплитуда перепада (импульса), t_ϕ – время нарастания (спада), измеренное на уровнях 0,1 А и 0,9 А. Например, при $A = 10$ В и $t_\phi = 1$ нс имеем $k_U = 1 \cdot 10^{10}$ В/с. Результат близок к примеру для синусоиды и указывает на фундаментальную связь между частотой и временем нарастания сигналов.

Не существует четкого критерия того, какие именно процессы можно отнести к высокоскоростным. Они различны в механике, авиации или в импульсной электронике. В середине XX века микросекундные импульсные процессы считались высокоскоростными, а в 60–70-х годах к высокоскоростным относили уже импульсные устройства наносекундного диапазона времен. Но уже к концу XX века появились импульсные устройства с субнаносекундной (примерно до 0,1 нс) длительностью фронтов импульсов и началось интенсивное освоение пикосекундного (от 1 до 1000 пс) диапазона времен нарастания импульсов. Скорость изменения напряжения в устройствах этого временного диапазона достигает $10^{12} - 10^{14}$ В/нс.

Следует отметить, что в большинстве реальных технических устройств используются как быстрые, так и медленные процессы. Подчас медленные процессы неотделимы от быстрых, и такое отделение является искусственным. Часто генераторы даже субнаносекундной длительности работают с частотами всего в сотни герц, а иногда и ниже. Поэтому определенное место в данной книге уделено и сравнительно низкочастотным приборам и устройствам, применяемым совместно с высокоскоростными устройствами.

1.2. Синусоидальные и близкие к ним сигналы и их свойства

1.2.1. Колебательные системы, создающие синусоидальные колебания

Многие технические и электрические системы и устройства (например, механические маятники, камертоны, струны, колебательные LC -контуры и др.) без потерь или с малыми потерями при отклонении какого-либо параметра от его исходного значения (в момент времени $t = 0$) проявляют свойства колебательных систем с отклонением этого их параметра по синусоидальному закону. Такие колебательные системы описываются линейным дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2a \frac{dx(t)}{dt} + bx(t) = 0. \quad (1.4)$$

Здесь $x(t)$ – изменяющийся во времени параметр системы (например, напряжение $u(t)$ или ток $i(t)$ в электрических или электронных устройствах), a и b – постоянные параметры, задающие характер колебательных процессов. Имея нулевую правую часть, уравнение (1.4) описывает свободные колебания в системе. Если в правой части (1.4) вместо 0 поставить функцию времени (функцию воздействия), то уравнение (1.4) будет описывать систему, находящуюся под внешним воздействием. Ныне основой для математического моделирования колебательных систем стали системы компьютерной математики [10–14, 277–284].

1.2.2. Математическое представление синусоидальных сигналов

На рис. 1.1 представлены решения уравнения (1.4) в популярной системе компьютерной математики Mathcad [10]. Второй случай решения ($a = 0$, $b = 1$), соответствующий колебаниям в условиях отсутствия потерь в системе, соответствует генерации стационарных синусоидальных колебаний, имеющих неизменные во времени параметры.

Первый и третий случаи иллюстрируют экспоненциальное нарастание и экспоненциальный спад амплитуды синусоидальных колебаний. Строго говоря, это уже не синусоидальные колебания, по-

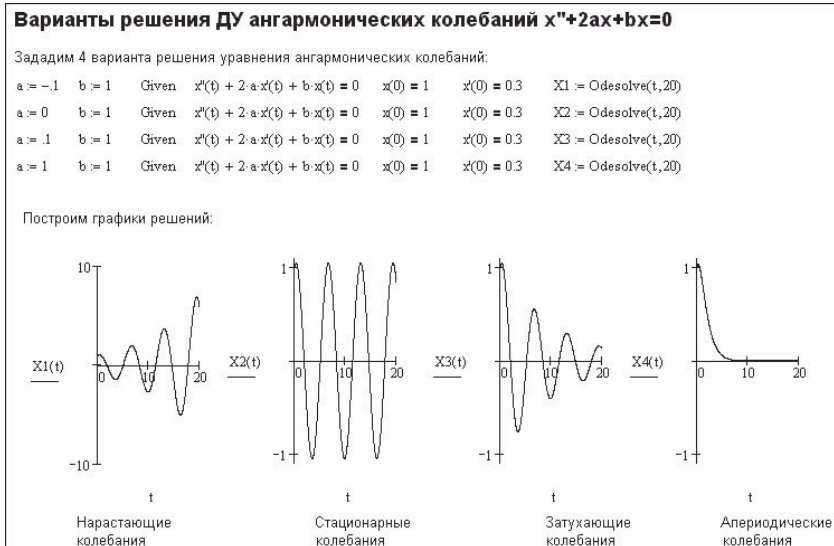


Рис. 1.1. Решение линейного дифференциального уравнения второго порядка, описывающего линейные колебательные системы

скольку амплитуды их периодов меняются во времени и нарушаются присущие синусоиде свойства (например, симметрии полуволн). Однако если изменение амплитуд происходит достаточно медленно, то колебания можно считать синусоидальными. На этом основан метод *медленно меняющихся амплитуд*.

Четвертое решение, показанное на рис. 1.1, соответствует преобразованию колебательной системы в аperiodическую. Сигнал при этом затухает по экспоненциальному закону. И его форма резко и качественно отлична от синусоидальной.

На практике линейные системы не позволяют получать стационарные синусоидальные колебания (сигналы), поскольку обеспечить точно нулевое значение параметра a практически невозможно. Малейшее отклонение этого параметра в ту или иную сторону приводит к появлению нарастающих (при $a < 0$) или убывающих (при $a > 0$) по амплитуде колебаний. Так что чисто синусоидальное колебание (второй случай на рис. 1.1) в линейной системе является теоретической абстракцией.

1.2.3. Стационарные и модулированные синусоидальные сигналы

Временные зависимости стационарных синусоидальных колебаний для электрических систем описываются хорошо известными выражениями:

$$u(t) = U_M \sin(2\pi ft + \theta) \quad \text{и} \quad i(t) = I_M \sin(2\pi ft + \theta). \quad (1.5)$$

Синусоидальные сигналы характеризуются тремя параметрами:

- U_M или I_M – амплитуда переменного напряжения или тока (измеряется в вольтах или амперах);
- f – частота (число периодов, возможно неполных) в единицу времени (измеряется в герцах – один период в секунду);
- θ – фазовый сдвиг (сдвиг зависимостей в долях периода, для рис. 1.4 фазовый сдвиг равен 0).

Типичные временные зависимости синусоидальных колебаний представлены на рис. 1.2. При стационарных синусоидальных колебаниях все три параметра их неизменны во времени. Собственно говоря, только такое колебание (сигнал) является строго синусоидальным. Изменение любого параметра во времени означает *модуляцию колебаний* – амплитудную, частотную или фазовую. Изменение параметра во времени означает, что сигнал становится принципиально иным – *нестационарным*.

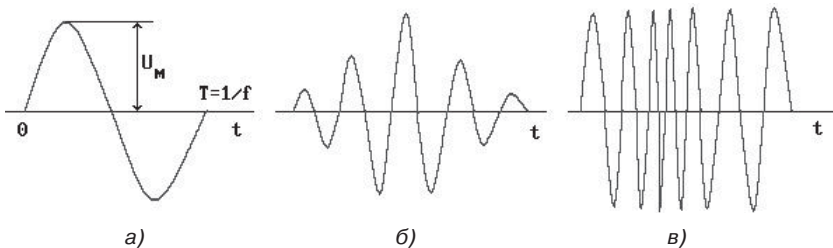


Рис. 1.2. Временная зависимость синусоидального сигнала:
а) один период сигнала, б) амплитудно-модулированный сигнал,
в) частотно-модулированный сигнал

Синусоидальные сигналы являются периодическими, то есть их временная зависимость повторяется и имеет место условие $u(t) = u(t + T)$, где $T = 1/f$ – период повторения сигнала. Фазовый сдвиг сигналов напряжения и тока (или входного и выходного напряже-

ний) связан с влиянием реактивных компонент (L и C) цепей, а также с работой различных фазосдвигающих цепей, например фазоинверторов и трансформаторов. Фазовый сдвиг измеряется в градусах (360° соответствуют сдвигу на период) или в радианах (2π радиан соответствуют сдвигу на период).

1.2.4. Мощность синусоидальных сигналов

Временная зависимость синусоидального напряжения представлена на рис. 1.2а. Нетрудно заметить, что напряжение плавно изменяется в пределах от $-U_M$ до $+U_M$, что создает изменение мощности сигнала во времени. Стало быть, можно говорить о мгновенной мощности

$$\begin{aligned} P(t) &= u(t)i(t) = I_M^2 R \sin^2(2\pi ft + \theta) = \\ &= \frac{I_M^2 R}{2} (1 + \sin(2(2\pi ft + \theta))) = \frac{U_M^2}{2R} (a + \sin(2(2\pi ft + \theta))). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Она пульсирует с удвоенной частотой и достигает пиковых значений

$$P = I_M U_M = I_M^2 R = U_M^2 / R \quad (1.7)$$

в моменты времени, когда уровень сигнала равен максимальному значению во время положительной и отрицательной полуволн. Удвоение частоты пульсаций мощности легко понять – мощность не зависит от полярности полуволн синусоидального сигнала и достигает пика в середине каждой полуволны.

Средней, или активной, мощностью называют мощность, усредненную за период. Для синусоидального напряжения она равна:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{I_M U_M}{2} = \frac{I_M^2 R}{2} = \frac{U_M^2}{2R}. \quad (1.8)$$

Выделяемое нагрузкой источников переменного тока тепло пропорционально активной мощности.

Отличие реальной формы сигнала от синусоидальной означает появление в спектре сигнала новых гармонических составляющих – гармоник с частотой, кратной частоте f сигнала. Более подробно этот вопрос рассматривается в главе 2.