

Содержание

Предисловие и обзор литературы	10
Благодарности и адреса для переписки	14
Глава 1. Генераторы синусоидальных сигналов	15
<i>1.1. Основные типы сигналов и их параметры</i>	<i>15</i>
1.1.1. Сигналы постоянного уровня	15
1.1.2. Источники постоянного напряжения и тока	16
1.1.3. Погрешность измерений в цепях постоянного тока	18
1.1.4. Фон, наводки и шум источников постоянного напряжения и тока	20
<i>1.2. Источники переменного напряжения и тока</i>	<i>21</i>
1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока	21
1.2.2. Истинное среднеквадратическое значение (True RMS)	22
1.2.3. Типы источников синусоидального напряжения	24
1.2.4. Фазовый шум генераторов	25
<i>1.3. Схемотехника аналоговых генераторов синусоидальных сигналов</i>	<i>26</i>
1.3.1. Обобщенная схема аналогового генератора синусоидального напряжения	26
1.3.2. RC-генераторы	28
1.3.3. LC-генераторы синусоидального напряжения	30
1.3.4. Генераторы на пьезокерамических фильтрах	34
1.3.5. Кварцевые резонаторы и генераторы	35
1.3.6. Промышленные модули кварцевых генераторов	39
1.3.7. Пути улучшения параметров генераторов синусоидальных сигналов	40
<i>1.4. Серийные RC-генераторы низких частот</i>	<i>43</i>
1.4.1. Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118	43
1.4.2. Генераторы, выпускаемые фирмой МНИПИ	43
1.4.3. Генератор ГЗ-126	44
1.4.4. Звуковые генераторы GAG 809/810 фирмы GW Instek	45
<i>1.5. Аналоговые ВЧ- и СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов</i>	<i>46</i>
1.5.1. Основные типы генераторов стандартных сигналов	46
1.5.2. Советские ВЧ-генераторы стандартных сигналов	47
1.5.3. Радиочастотные генераторы HG-1500/1500D фирмы MCP	48
1.5.4. Радиочастотный генератор GRG-450B фирмы GW Instek	49
1.5.5. Аналоговые СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов	50

1.6. Основы цифрового синтеза частоты и формы сигналов	52
1.6.1. Основные методы цифрового синтеза сигналов	52
1.6.2. Генераторы на основе цифрового синтезатора частот	52
1.6.3. Генераторы произвольных функций (AFG)	54
1.6.4. Генераторы сигналов произвольной формы (AWG)	55
1.6.5. Шум квантования у генераторов с цифровым синтезом формы сигналов	55
1.7. Генераторы синусоидальных сигналов с цифровым синтезом умеренной сложности	58
1.7.1. Отечественные генераторы с цифровым синтезом	58
1.7.2. Генератор SG-1501B фирмы JungJin	60
1.7.3. Генератор VC2003 фирмы VICTOR	61
1.7.4. Генераторы высокочастотные АКТАКОМ АНР-2015/ 2150	62
1.7.5. Генераторы высокочастотные АК ИП ГСВЧ-3000	63
1.8. Генераторы с цифровым синтезом фирмы Agilent Technologies	63
1.8.1. Генератор аналоговых сигналов E4428C	63
1.8.2. Генератор аналоговых сигналов N5181C MSG	65
1.8.3. Генератор аналоговых сигналов E8663B	65
1.8.4. Генератор N9310A RF	66
1.8.5. Генератор E8257D PSG с частотой до 67 ГГц	68
1.9. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы ROHDE&SCHWARTZ	69
1.9.1. Портативный переносный генератор R&S SM300	69
1.9.2. Стационарные генераторы R&S серии SML/SMV	70
1.9.3. Стационарные генераторы R&S SMA/SMB/SMF100A	71
1.9.4. Серия генераторов R&S SMP0* с частотами до 20, 27 и 40 ГГц	73
1.9.5. Серия генераторов R&S SMR** с частотами до 60 ГГц	74
1.9.6. Векторное представление сигналов и цифровая модуляция	75
1.9.7. Векторные генераторы фирмы R&S SMU200A/SMJ100A/SMATE200A	77
1.9.8. Векторные генераторы фирмы Model 2910 Keithley	79
1.10. Генератор со сверхмалыми нелинейными искажениями DS360 фирмы Stanford Research Systems	81
1.11. Генераторы качающейся частоты (ГКЧ) и измерители АЧХ	82
1.11.1. Промышленные ГКЧ и измерители АЧХ	82
1.11.2. Работа с измерителем АЧХ X1-50	84
1.12. Гетеродинные индикаторы резонанса (ГИР)	88
1.12.1. Назначение и принципы работы ГИР	88
1.12.2. Простой ГИР на одном полевом транзисторе	89
1.12.3. ГИР на транзисторном аналоге негатрона	90

Глава 2. Генераторы импульсов	91
<i>2.1. Импульсные сигналы и принципы их генерации</i>	<i>91</i>
2.1.1. Формы и параметры импульсов	91
2.1.2. Принципы генерации импульсных сигналов	94
2.1.3. Спектр сигналов	95
<i>2.2. Схемотехника простых генераторов импульсов</i>	<i>98</i>
2.2.1. Импульсные генераторы на транзисторах и интегральных микросхемах	98
2.2.2. Импульсные генераторы на интегральном таймере	99
2.2.3. Обзор импульсных устройств на негатронах	102
2.2.4. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах	104
2.2.5. Особенности лавинных транзисторов	106
2.2.6. Емкостной релаксатор на лавинном транзисторе	108
2.2.7. Генератор прямоугольных импульсов на лавинном транзисторе с накопительной линией	110
2.2.8. Генератор наносекундных импульсов тока в 25 А на лавинном транзисторе	111
<i>2.3. Серийные генераторы импульсов</i>	<i>114</i>
2.3.1. Обзор рынка серийных генераторов импульсов	114
2.3.2. Типовая функциональная схема аналогового импульсного генератора	114
2.3.3. Отечественные серийные генераторы микросекундных импульсов	115
2.3.4. Отечественные серийные генераторы наносекундных импульсов	118
2.3.5. Универсальные генераторы импульсов серии 8500 фирмы Tabor	122
<i>2.4. Генераторы телевизионных сигналов</i>	<i>123</i>
2.4.1. Назначение и особенности генераторов телевизионных сигналов	123
2.4.2. Генератор телевизионных сигналов PG-401L фирмы EZ Digital	124
2.4.3. Виртуальные генераторы телевизионных сигналов АКТАКОМ АНР-3125/3126	125
2.4.4. Линейка генераторов телевизионных сигналов корпорации Tektronix	129
2.4.5. Стационарный генератор телевизионных сигналов Г6-35	131
<i>2.5. Генераторы коротких импульсов</i>	<i>132</i>
2.5.1. Принципы генерации импульсов с субнаносекундным временем нарастания	132
2.5.2. Генератор HZ60-3 для испытания аналоговых осциллографов	134
2.5.3. Исследование динамики излучения лазерных диодов	135

2.5.4. Генераторы пикосекундных импульсов серии 4000 фирмы Picosecond Pulse Lab	137
2.5.5. Импульсные генераторы и оптические модули фирмы DEI	141
2.5.6. Высоковольтные модули HVS фирмы ALPHALAS	143
2.5.7. Генераторы наносекундных импульсов на фотоно-инжекционных импульсных коммутаторах	145
Глава 3. Функциональные генераторы	151
<i>3.1. Принципы построения функциональных генераторов</i>	<i>151</i>
3.1.1. Основные типы функциональных генераторов	151
3.1.2. Функциональные генераторы с интегратором на интегральном операционном усилителе	152
3.1.3. Пример простой схемы функционального генератора	153
3.1.4. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током	154
3.1.5. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного	157
<i>3.2. Микросхема функционального генератора XR-2206</i>	<i>159</i>
3.2.1. Назначение и вид микросхемы XR-2206	159
3.2.2. Блок-схема и принципиальная схема микросхемы XR-2206	160
3.2.3. Назначение выводов микросхемы XR-2206	162
3.2.4. Типовая схема применения микросхемы XR-2206	162
<i>3.3. Микросхема функционального генератора MAX038</i>	<i>165</i>
3.3.1. Назначение и вид микросхемы MAX038	165
3.3.2. Функциональная схема микросхемы MAX038	165
3.3.3. Основные схемы включения микросхемы MAX038	166
3.3.4. Осциллограммы и спектры сигналов микросхемы MAX038	166
<i>3.4. Серийные аналоговые функциональные генераторы</i>	<i>168</i>
3.4.1. Функциональные генераторы времен СССР	169
3.4.2. Функциональные генераторы фирмы МНИПИ	170
3.4.3. Функциональные генераторы фирмы Wavetek Meterman	173
3.4.4. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы METEX	173
3.4.5. Программа стыковки приборов METEX с компьютером	177
3.4.6. Измерительные комплексы MS-9160/9170 фирмы METEX	179
3.4.7. Функциональные генераторы MFG-82**А фирмы MATRIX	181
3.4.8. Функциональные генераторы фирмы EZ Digital	184
3.4.9. Функциональный генератор VC2002 фирмы VICTOR	186
3.4.10. Функциональные генераторы АКТАКОМ	187
3.4.11. Заключительные замечания по аналоговым функциональным генераторам	188

3.5. Функциональные генераторы с цифровым синтезом выходных сигналов	189
3.5.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов	189
3.5.2. Генератор сигналов VC2003 фирмы VICTOR	190
3.5.3. Программируемый функциональный генератор G5100	191
3.5.4. Функциональный свип-генератор B821 фирмы Protek	192
3.5.5. Функциональные генераторы АКТАКОМ серии АНР	193
3.6. Виртуальные функциональные генераторы	195
3.6.1. Назначение и особенности виртуальных функциональных генераторов	195
3.6.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman	195
3.6.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman	198
3.6.4. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000	200
3.6.5. Функциональные генераторы АКТАКОМ АНР-3121/3122	201
3.6.6. Комбинированный прибор АКТАКОМ АСК-4106	202
Глава 4. Генераторы сигналов произвольной формы	207
4.1. Генераторы сигналов произвольной формы зарубежных фирм	207
4.1.1. Назначение и особенности генераторов сигналов произвольной формы	207
4.1.2. Генераторы сигналов произвольной формы фирмы Protek	209
4.1.3. Генераторы сигналов произвольной формы АКТАКОМ и АК ИП	209
4.1.4. Функциональный генератор 33220А фирмы Agilent	210
4.1.5. Двухканальный генератор произвольных сигналов R&S AM300	212
4.1.6. Генераторы произвольных сигналов фирмы Taboq	214
4.2. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000	215
4.2.1. Внешний вид и органы управления генератора AFG3000	215
4.2.2. Технические характеристики генераторов AFG3000	219
4.2.3. Работа с генератором AFG3000	220
4.2.4. Основные возможности генераторов AFG3101	221
4.2.5. Основные возможности генераторов AFG3251/3252	233
4.3. Программное обеспечение генераторов AFG3000	237
4.3.1. Назначение программы ArbExpress и ее интерфейс	237
4.3.2. Создание сигналов стандартных форм	238
4.3.3. Настройка на типы приборов и работа с файлами	240
4.3.4. Программирование формы сигналов	242
4.3.5. Применение графического редактора формы сигналов	247

4.3.6. Математические операции с сигналами	248
4.3.7. Построение сигнала по осциллограмме	249
4.4. Работа измерительных приборов с системой MATLAB	253
4.4.1. Назначение матричной системы MATLAB	253
4.4.2. Подготовка к стыковке осциллографов с системой MATLAB	254
4.4.3. MATLAB-программы для работы с цифровыми осциллографами	256
4.4.4. Спектральный анализ осциллограмм в MATLAB	260
4.4.5. Построение спектрограмм осциллограмм в MATLAB	263
4.4.6. Управление генераторами серии AFG3000 от матричной системы MATLAB	266
4.4.7. Применение системы MATLAB при совместной работе генератора и цифрового осциллографа	269
4.5. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG	272
4.5.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG	272
4.5.2. Генераторы серии AWG7000	273
4.5.3. Генераторы серии AWG5000	276
4.6. Генераторы цифровых сигналов произвольной формы	279
4.6.1. Функциональная схема генератора паттернов данных	279
4.6.2. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG2020A	280
4.6.3. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG5078/5274/DTG5334	281
4.7. Программа NI Signal Express Tektronix Edition	284
4.7.1. Назначение программы	284
4.7.2. Выбор и запуск программы	285
4.7.3. Основное окно программы при работе с осциллографом	287
4.7.4. Работа с инструментами программы	289
4.7.5. Работа с генератором серии AFG3000	290
4.7.6. Дополнительные возможности программы	294
Глава 5. Применение генераторов сигналов	297
5.1. Современная лаборатория разработчика электронных устройств	297
5.1.1. Назначение лаборатории	297
5.1.2. Лаборатория начального уровня	298
5.1.3. Лаборатория среднего уровня	300
5.1.4. Лаборатория высшего (HiFi) уровня	305
5.2. Контроль параметров генераторов сигналов	314
5.2.1. Осциллографический контроль формы сигналов	314
5.2.2. Контроль и измерение амплитудных параметров генераторов	316
5.2.3. Контроль временных параметров сигналов генераторов	317

5.2.3. Контроль временных параметров сигналов генераторов	317
5.2.4. Проведение автоматических измерений	318
5.2.5. Контроль времени нарастания импульсов генератора	319
5.2.6. Контроль спектра сигналов с помощью осциллографа	320
5.2.7. Анализ спектра сигналов генераторов анализатором спектра реального времени	322
5.3. Примеры применения генераторов сигналов	328
5.3.1. Применение AFG3000 для запуска формирователей импульсов со временами нарастания и спада до 50 пс	328
5.3.2. Измерение АЧХ осциллографов	336
5.3.3. Проверка переходных характеристик осциллографов	337
5.3.4. Применение AFG3000 для измерения добротности LC-контуров	338
5.3.5. Применение AFG3000 в качестве генератора качающейся частоты	340
5.3.6. Применение функциональных генераторов в качестве ГКЧ	341
5.3.7. Исследование линейных цепей	345
5.3.8. Применение генераторов Tektronix AFG3000 для измерения емкости	349
5.3.9. Контроль динамики интегральных микросхем	352
5.3.10. Контроль индикаторной панели	354
5.3.11. Контроль режима XY осциллографов	355
5.4. Специальные применения генераторов сигналов	355
5.4.1. Проверка чувствительности радиоприемников	355
5.4.2. Создание сигнала с кодоимпульсной модуляцией	357
5.4.3. Контроль импульсных сигналов с помощью глазковых диаграмм	360
5.4.4. Контроль за деградацией сигнала при его передаче по каналам связи	362
5.4.5. Контроль ультраширокополосных систем	363
5.4.6. Генератор R&S SMA100A как средство контроля аэронавигационных систем	367
Литература	369

Предисловие и обзор литературы

Современная измерительная техника переживает драматический период. Пожалуй, впервые за многие десятки лет техника генерации, регистрации и измерения сигналов сильно отстала от многих передовых направлений применения электронных устройств. Так, даже в таких массовых устройствах, как микропроцессоры для персональных компьютеров, цифровые и импульсные схемы уже работают на частотах в единицы ГГц (10^9 Гц), а в ближайшей перспективе будут работать на частотах в десятки ГГц и выше [1].

Основной разработчик микропроцессоров — корпорация Intel объявила о создании терагерцовых полевых микротранзисторов с изолированным затвором, работающих на частотах в тысячи ГГц. Еще большие рабочие частоты имеют гетеропереходные Si-Ge микротранзисторы. При исследовании прохождения мощных световых импульсов через нелинейные среды обнаружены явления сокращения длительности их перепадов до пикосекунд и долей пикосекунды. Возникла необходимость в регистрации и имитации таких сигналов.

Между тем, только недавно серийные электронные стробоскопические осциллографы преодолели частотный барьер в 100 ГГц и фактически остановились у него [2-5]. Это уникальные и дорогие приборы, объем продаж которых у нас составляет единицы приборов в год. От них заметно отстали разработки генераторов импульсных сигналов. Так, генераторы импульсов субнаносекундной длительности выпускаются тоже как уникальные и дорогие приборы очень небольшим числом фирм, преимущественно зарубежных.

В период распада СССР отечественные разработки в области генерации сигналов, особенно импульсных, в былые времена проводимые с большим размахом [6-16], практически прекратились. Этим немедленно воспользовались наши западные кон-

куренты — на наш рынок хлынул поток зарубежных разработок таких устройств, которые не так давно мы разрабатывали вполне самостоятельно. Это особенно печально, если учесть, что во времена СССР развитие теории и проектирования импульсных устройств у нас не уступали зарубежному уровню, что отражено в многочисленной монографической и учебной литературе тех лет [8-24].

Главной причиной указанного отставания у нас стало отсутствие современной элементной базы и разрушение производственных связей между странами — бывшими республиками СССР. Достаточно отметить, что большая часть советских скоростных осциллографов и генераторов импульсов создавалась и выпускалась в Вильнюсском НИИ радиоизмерительных приборов и в Минском приборостроительном институте, множество микросхем выпускалось в Киевском НПО "Кристалл" и т. д.

Автор этой монографии, заведующий кафедрой промышленной электроники Смоленского филиала МЭИ, еще с конца 60-х годов занимался проблематикой импульсных устройств, начиная с исследования уникальных возможностей биполярных транзисторов в лавинном режиме их работы. В 1973 г. вышла его монография [21] — единственная в мире по данному направлению [20, 25]. В те годы были разработаны и всесторонне изучены первые советские германиевые специальные лавинные транзисторы серии ГТ338 [26-29].

Обширное исследование германиевых и кремниевых транзисторов в лавинном режиме работы [26-45, 73] показало, что особой необходимости в создании специальных кремниевых лавинных транзисторов нет, поскольку большинство обычных серийных кремниевых транзисторов надежно работает в лавинном режиме и не уступает параметрам специальных кремниевых транзисторов, созданных за рубежом (кстати, тоже на основе обычных серийных транзисторов).

В ходе этого исследования был обнаружен и описан в [21, 32-38] 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, так и в разработке целого ряда уникальных и серийных генераторов мощных импульсов. Недавно была издана новая книга по применению лавинных транзисторов [73], в которой отражены достижения в этой области за последние годы, увы, по большей части зарубежные.

В дальнейшем наши исследования охватили применение и других типов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Так, впервые были показаны уникальные импульсные свойства новых в то время мощных ВЧ и СВЧ МДП-транзисторов (полевых транзисторов со структурой "металл-диэлектрик-полупроводник" и мощных СВЧ арсенид-галлиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки [17, 18]. Совместное их применение с лавинными транзисторами [42-69, 73] открывает новые возможности в построении генераторов импульсов нано- и даже пикосекундного диапазона времен нарастания и спада. Многие из этих возможностей до сих пор не реализованы в серийных генераторах импульсов и ждут своей очереди.

В области генерации импульсов микро- и миллисекундной длительности долгожителями оказались устройства на однопереходных транзисторах [22-24]. Наряду с обычными однопереходными транзисторами были созданы программируемые однопереходные транзисторы. Основной областью их применения стали устройства управления энергетическими преобразователями, в частности, установленными на борту самолетов и других транспортных средств. Неприхотливость и высокая надежность таких устройств способствовали их применению и в наши дни [71].

Схемы на других негатронах (приборах с падающими участками вольт-амперных характеристик), например на туннельных диодах, лямбда-диодах и транзисторах и их аналогах показали высокие функциональные возможности, но широкого распространения не получили. Причиной стали их известные недостатки — применение в релаксаторах индуктивностей, плохая технологичность и др.

Не очень прижились и импульсные устройства на стандартных логических интегральных микросхемах и интегральных операционных усилителях, например [16]. Эти микросхемы были изначально оптимизированы для построения цифровых и логических, а не импульсных устройств, и потому не реализуют в последних нужные возможности. Хотя отдельные схемные решения, например [70, 74-76], показали интересные возможности. Весьма привлекательными надолго оказались возможности специализированных для импульсных применений микросхем интегральных таймеров [10, 11]. В наше время они превратились в "рабочих лошадок", используемых повсеместно, но не очень привлекательных для глубоких исследований.

Между тем, потребность в стабильных и модулируемых различными видами модуляции сигналах, 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 [77-85] и разнообразных систем цифровой связи, в частности мобильных [86-88].

Во времена СССР потребности в новых средствах генерации сигналов удовлетворялись разработкой огромного числа всевозможных аналоговых генераторов сигналов — низкочастотных, высокочастотных, сверхвысокочастотных и импульсных. Уже тогда была ясна необходимость в универсальных генераторах сигналов типовых форм — синусоидальной, прямоугольной, пилообразной и треугольной. Это привело к развитию некоторых, давно известных устройств — функциональных генераторов [8, 9, 91]. Их частотный диапазон достиг десятков МГц, габариты и масса приборов уменьшились в несколько раз, а функциональные возможности заметно возросли. Обязательной, к примеру, стала электронная регулировка частоты, а нередко и амплитуды, и возможность применения их в качестве генераторов качающейся частоты.

Начиная с разработок генераторов телевизионных сигналов, например в виде приставок к персональному компьютеру [92, 93], появилась необходимость в генерации сигналов намного более сложной формы, чем у функциональных генераторов. К тому же по диапазону частот и стабильности частоты аналоговые функциональные генераторы оказались не способными удовлетворить требования к современным системам

цифровой связи, особенно многоканальным, таким, как системы мобильной связи. Острым стал вопрос об осуществимости регулировки всех параметров сигналов генераторов в широких пределах электронными методами.

В связи с этим появились новейшие разработки генераторов сигналов на основе прямого цифрового синтеза частот и форм сигналов [94-102]. 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 цифровыми системами и современными персональными и промышленными компьютерами и открывает широкие возможности их применения в испытании и отладке различных электронных и радиотехнических систем и устройств [102-124].

Эта книга посвящена описанию техники генерации сигналов различной формы — от простых синусоидальных и импульсных сигналов до мощных наносекундных импульсов и сложнейших сигналов произвольной формы. Хотя книга не является каталогом по генераторам сигналов, она дает достаточно подробный обзор рынка современных генераторов сигналов и областей их применения. Автор надеется, что это практически поможет нашим специалистам в выборе современных генераторов сигналов различного типа.

Книга рассчитана на специалистов в различных областях науки и техники, применяющих генераторы сигналов, научных работников и инженеров, студентов и преподавателей технических университетов и вузов. Она полезна и подготовленным радиолюбителям.

Благодарности и адреса для переписки

Автор благодарит генерального директора фирмы "Эликс" А. А. Афонского и ее сотрудников А. Ю. Уткина и И. А. Шумского за помощь в практическом знакомстве с некоторыми из описанных в этой книге уникальных приборов и информацией об их характеристиках.

Своими впечатлениями о книге читатель может поделиться с автором, написав ему по адресу электронной почты vpdyak@keytown.com. А также о своих соображениях читатель может сообщить по адресу издательства, выпустившего книгу.

Генераторы синусоидальных сигналов

В этой главе описаны техника генерации и генераторы сигналов синусоидальной формы — как немодулированных, так и модулированных. Эти сигналы широко применяются при тестировании различных радиоэлектронных устройств. Наряду с классическими вариантами таких устройств (LC -, RC - 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 промышленным генераторам сигналов, генераторам качающейся частоты и гетеродинным индикаторам резонанса.

1.1. Основные типы сигналов и их параметры

1.1.1. Сигналы постоянного уровня

Термин "*сигнал*" происходит от слова *signum* (знак), где знак подразумевается не в смысле полярности напряжения или тока, а в информационном смысле — сигналы являются переносчиками неких знаков, образующих информационную основу (алфавит) передаваемых сообщений. Строго говоря, это означает, что постоянный ток $I=\text{const}$ или напряжение $U=\text{const}$, как и иные представления стационарных процессов, параметры которых не меняются во времени, к сигналам не относятся.

Тем не менее, мы будем относить постоянный ток к простейшим сигналам, которые несут определенную информацию: полярность напряжения или тока и их величина — напряжение в вольтах или ток в амперах. Не стоит также забывать о том, что в природе нет чисто стационарных явлений, все процессы медленно или быстро меняются.

Сами по себе постоянные напряжения и токи в качестве сигналов по существу не используются, хотя манипуляция (прерывание постоянного тока) использовалась в

первых телеграфных аппаратах. Но постоянные напряжения и токи, как правило, подмешиваются к сигналам (синусоидальным или импульсным) и задают их смещение по вертикали — Offset. Поэтому знать их основные характеристики необходимо.

1.1.2. Источники постоянного напряжения и тока

Разумеется, сигнал постоянного уровня может иметь любую физическую природу, например, представлять давление атмосферы, температуру окружающей среды и т. д. Однако в дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только источников постоянного напряжения и тока.

Источники напряжения и тока принято подразделять на *первичные* (например, химические элементы) и *вторичные* (например, выпрямители напряжения питающей цепи), на *идеальные* и *реальные* источники.

Реальные источники постоянного напряжения характеризуется эквивалентной ЭДС E_s и эквивалентным сопротивлением R_s . Реальный *источник напряжения* можно описать эквивалентной схемой (рис. 1.1, а), содержащей последовательно включенные источники электродвижущей силы (ЭДС) E и внутреннюю резистивность R_i . Сразу же отметим, что термин "*резистивность*" у нас не прижился, и многие предпочитают более привычный термин "*сопротивление*", так что R_i — внутреннее сопротивление. В тоже время "*сопротивление*", как деталь электронных схем, стали называть резистором.



Рис. 1.1. Эквивалентные схемы реального источника постоянного напряжения (а) и тока (б)

У *идеального источника* напряжения $R_i=0$. Строго говоря, внутреннее сопротивление — комплексная величина. Но пока речь идет о постоянных напряжениях и токах, мы ограничимся только действительными R_i , которые определяются как $R_i=dU/dI$, где dU — приращение напряжения на зажимах источника, а dI — приращение отбираемого от него тока. R_i может быть нелинейной величиной, зависящей от тока, и даже отрицательной (приборы с падающей вольт-амперной характеристикой — *негатроны*). Но в дальнейшем мы ограничимся представлением R_i как сопротивления постоянного (линейного).

Реальный *источник постоянного тока* состоит из идеального источника тока I и параллельно включенного внутреннего сопротивления R_i (рис. 1.1, б). Первичные источники постоянного тока хотя и существуют, но широкого практического применения не нашли. Тем не менее, с возможностью их существования (как и с необходимо-

стью измерения их параметров) надо считаться. Если внутреннее сопротивление источников постоянного напряжения обычно очень мало, то внутреннее сопротивление источников постоянного тока весьма велико и достигает десятков-сотен кОм, а порою и единиц-десятков МОм и выше. У идеального источника постоянного тока $R_i = \infty$.

Первичных источников постоянного напряжения существует достаточно много: электрохимические и нормальные элементы, гальванические и аккумуляторные батареи, солнечные батареи и др. К вторичным источникам постоянного напряжения относятся всевозможные выпрямители, стабилизаторы напряжения (например, на кремниевых стабилитронах или компенсационные, микросхемы для создания высокостабильных (опорных напряжений) и т. д. Однако, за исключением источников высокостабильного напряжения большинство этих устройств используется не в измерительной, а в преобразовательной технике.

Характеристиками источников постоянного тока в некотором диапазоне напряжений обладают многие полупроводниковые приборы, например биполярные и полевые транзисторы. Выпускаются также специальные микросхемы для стабилизации малых токов, например, микросхема стабилизатора постоянного тока КЖ101А, которая позволяет стабилизировать ток от десятков до сотен мкА в диапазоне напряжений от 1,8 до 230 В. Значение R_i у нее составляет 8 МОм. Однако не следует путать устройства с большим динамическим дифференциальным сопротивлением с реальными первичными источниками постоянного тока. Первые всегда являются потребителями электрической энергии, тогда как вторые — ее источниками.

Измерение ЭДС первичных источников напряжения (например, аккумуляторов в начале и в конце заряда, или гальванической батареи после покупки или хранения) является довольно частой и довольно простой задачей. Как видно из измерительной схемы рис. 1.2, оно сводится просто к подключению вольтметра измерительной головкой V с входным сопротивлением $R_{вх}$ к источнику напряжения. Учтите, что измерительная головка V на деле может быть измерителем тока, например, микроамперметром тестера.

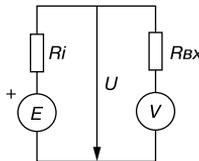


Рис. 1.2. Измерение ЭДС первичного источника напряжения постоянного тока

Важное значение имеет измерение напряжения на резисторах произвольных электрических и электронных цепей, когда их внутреннее сопротивление сопоставимо с $R_{вх}$ (рис. 1.3). В этом случае внешняя относительно резистора R цепь характеризуется эквивалентной ЭДС E_s и эквивалентным сопротивлением R_s . Они могут быть найдены по известным законам и методам электротехники (например, по закону Кирхгофа, методам контурных токов или узловых потенциалов).

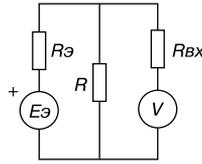


Рис. 1.3. Эквивалентная схема измерения напряжения U на резисторе R произвольной цепи постоянного тока

В данном случае важно, что эквивалентное внутреннее сопротивление внешней цепи $R_э$ редко бывает очень малым, и учет его, как и входного сопротивления вольтметра $R_{вх}$, как правило, необходим. Влияние $R_{вх}$ заключается в шунтировании сопротивления R , а влияние $R_э$ обусловлено созданием делителя напряжения. Таким образом, для напряжения на резисторе R имеем:

$$U = E_э \frac{R \parallel R_{вх}}{R_э + R \parallel R_{вх}} = E_э \frac{R_э}{R_э + R_э}, \text{ где } R_э = R \parallel R_{вх} = \frac{R \cdot R_{вх}}{R + R_{вх}}. \quad (1.1)$$

Пример: внешняя цепь имеет $E_э=10$ В и $R_э=10$ кОм. Вычислить напряжение на $R=100$ кОм, если оно измеряется электронным вольтметром с $R_{вх}=10$ МОм. Вначале вычислим $R_э=9,9 \cdot 10^{-4}$. Тогда $U=9,083$ В. Итак, в данном случае напряжение на резисторе R почти на 1 В меньше напряжения $E_э$. Отсюда вытекает желательность применения вольтметров с как можно большим входным сопротивлением. Это обеспечивают только электронные вольтметры.

Измерители мощности постоянного тока P широкого практического применения не нашли, поскольку такая мощность легко измеряется по проходящему через резистор R току I или по падению напряжения U на резисторе:

$$P = R \cdot I^2 \text{ или } P = U^2 / R. \quad (1.2)$$

Физически мощность трактуется как скорость изменения энергии во времени. В цепях постоянного тока это изменение происходит с постоянной скоростью, так что мощность является константой.

1.1.3. Погрешность измерений в цепях постоянного тока

Любые измерения возможны с некоторой погрешностью. Обычно у измерительных приборов задается основная и дополнительная погрешности. Основная погрешность определяется для некоторых идеализированных условий, например для пренебрежительно малого влияния температуры, при отсутствии влияния внешних цепей и т. д. Дополнительная погрешность определяется при наличии влияния дополнительных факторов.

Все виды погрешностей мы рассматривать не будем — в описании каждого прибора приводится их перечень. Ограничимся рассмотрением погрешностей измерения напряжений. Абсолютная погрешность задается как разность между показанием вольтметра U и идеальным значением напряжения, которое измеряется $U_{и}$:

$$\Delta_U = U - U_{И}. \quad (1.3)$$

Относительная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к идеальному значению параметра:

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{U_{И}} = \frac{U - U_{И}}{U_{И}}. \quad (1.4)$$

Однако, задание относительной погрешности таким образом неудобно, поскольку она относится к каждому конкретному значению $U_{И}$. Поэтому чаще задается погрешность относительно верхнего предела измеряемого напряжения $U_{ИМАКС}$:

$$\delta_{ИМАКС} = \frac{U - U_{И}}{U_{ИМАКС}}. \quad (1.5)$$

Например, если вольтметр показывает на пределе 1 В напряжение 0,45 В при поданном на его вход напряжении 0,5 В, то погрешность составит $(0,45 - 0,5)/1 = -0,05$ или в процентах -5% . Знак погрешности указывает на то, что прибор дает заниженное показание. Часто погрешность задается в обе стороны, например $\pm 1\%$.

К сожалению, приходится считаться с тем, что погрешность возрастает при малых значениях параметра — вблизи нуля. Это может быть связано с нестабильностью нуля аналогового прибора или с дискретностью цифрового представления результата. У цифровых приборов часто такую погрешность выражают в числе знаков последнего разряда, например ± 1 или в общем случае $\pm N$, где N — целое число.

Теперь затронем немного вопрос о дополнительной погрешности, обусловленной конечными сопротивлениями — входного вольтметра и внутреннего источника напряжения. В этом случае напряжение, измеряемое вольтметром, равно

$$U = E \frac{R_{ВХ}}{R_i + R_{ВХ}}, \quad (1.6)$$

а абсолютная погрешность измерения напряжения, вызванная конечным R_i ,

$$\Delta_U = E - U = E \left(1 - \frac{R_{ВХ}}{R_i + R_{ВХ}} \right). \quad (1.7)$$

Относительная погрешность

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{E} = \frac{R_i}{R_i + R_{ВХ}}. \quad (1.8)$$

Пример: электронным вольтметром с $R_{ВХ} = 1$ МОм измеряется ЭДС цилиндрического аккумулятора $E = 1,25$ В. Если внутреннее сопротивление аккумулятора равно $R_i = 0,25$ Ом, то показания вольтметра согласно (1.8) будут $U = 1,2499996875$ В, абсолютная погрешность из-за конечности $\Delta_U / U = 3,125 \cdot 10^{-7}$ и относительная погрешность $\delta_U = 2,5 \cdot 10^{-7}$.

Практически у всех современных электронных вольтметров входное сопротивление $R_{ВХ}$ больше R_i на несколько порядков (см. пример выше), так что практически $U = E_{ВХ}$ и оценка погрешности от конечного значения $R_{ВХ}$ (и R_i) ныне при измерении

напряжения батарей не актуальна. В данном случае эта погрешность всецело определяется погрешностью измерения напряжения электронным вольтметром. Она, как правило, гораздо выше, чем погрешность учета R_i . Таким образом, измерение ЭДС батарей с гальваническими элементами и аккумуляторных батарей, как правило, может выполняться практически без учета их внутреннего сопротивления просто подключением электронного вольтметра (мультиметра) к их выходам. Однако считать это правилом при измерениях напряжения в произвольных цепях нельзя.

1.1.4. Фон, наводки и шум источников постоянного напряжения и тока

В природе идеальных источников постоянного напряжения и тока не существует. Реальные источники постоянного напряжения и тока, особенно вторичные, содержат характерные компоненты, отражающие их *неидеальность*:

- *Фон* — низкочастотные компоненты с частотами, кратными частоте промышленной сети.
- *Наводки* — чаще всего высокочастотные компоненты сигнала, обусловленные антенными свойствами проводов цепей, принимающих сигналы ВЧ и СВЧ.
- *Шум* — компонента шума, обусловленная хаотическими флуктуациями напряжения или тока, которые существуют практически у всех источников напряжения и тока.

Фон чаще всего наблюдается у источников напряжения (тока), у которых почти постоянное напряжение получают выпрямлением напряжения переменного тока с частотой сети $f_c = 50\text{--}60$ Гц (или 400 Гц в сетях бортовых устройств). При однополупериодном выпрямлении фон имеет основную частоту, равную f_c , а при двухполупериодном $2f_c$. В общем случае уровень фона определяется типом выпрямителя и эффективностью фильтра.

Наводки обусловлены антенным действием проводов. Могут быть низкочастотные наводки, например от проводов промышленной сети, которые находятся под высоким уровнем напряжения переменного тока (например, 220 В, 50 Гц). Такие наводки трудно отличить от фона.

На практике значительный уровень имеют наводки от источников ВЧ и СВЧ сигналов, например, от микроволновых и промышленных СВЧ-печей, мощных радиостанций и т. д. Часто их уровень бывает трудно предсказуемым, а частотный спектр таких наводок лежит в области частот от десятков кГц до нескольких ГГц.

Уровень фона и наводок характеризуется несколькими параметрами: амплитудой, двойной амплитудой, средним значением и среднеквадратическим значением. Определения всех этих параметров представлены ниже в разделе, посвященном источникам переменного тока.

Постоянные напряжения и токи неизменно имеют и шумовую компоненту. Но она настолько мала, что в большинстве случаев может не учитываться. Шунтирование источников напряжения высококачественным конденсатором большой емкости эффективно уменьшает шумы и наводки.

1.2. Источники переменного напряжения и тока

1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока

Самое широкое применение нашли синусоидальные переменные напряжения (рис. 1.4) и токи. Их временные зависимости описываются выражениями:

$$u(t) = U_M \sin(2\pi ft + \theta) \quad \text{и} \quad i(t) = I_M \sin(2\pi ft + \theta). \quad (1.9)$$

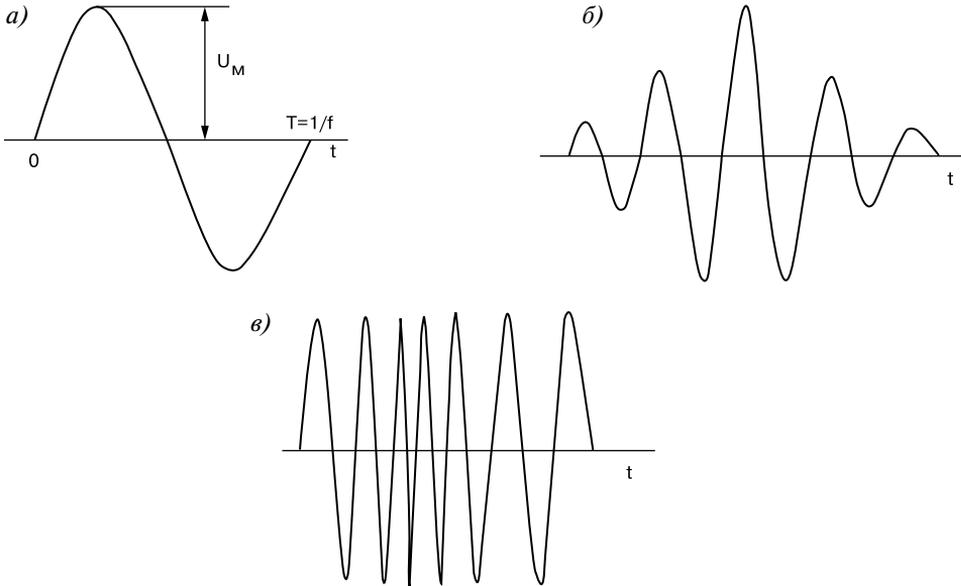


Рис. 1.4. *Временная зависимость синусоидального сигнала:*
 а — один период сигнала,
 б — амплитудно-модулированный сигнал,
 в — частотно модулированный сигнал

Синусоидальные сигналы характеризуются тремя параметрами:

- U_M или I_M — амплитуда переменного напряжения или тока;
- f — частота (число периодов, возможно, неполных) в единицу времени;
- θ — фазовый сдвиг (сдвиг зависимостей в долях периода, для рис. 1.4 фазовый сдвиг равен 0).

Синусоидальные сигналы являются периодическими, т. е. их временная зависимость повторяется, и имеют место условия $u(t)=u(t+T)$ и $i(t)=i(t+T)$, где $T=1/f$ — период повторения сигнала. Фазовый сдвиг сигналов напряжения и тока (или входного и выходного напряжений) связан с влиянием реактивных компонентов (L и C) цепей, а также с работой различных фазосдвигающих цепей, например фазоинверторов и транс-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru