В. П. Дьяконов

Генерация и генераторы сигналов

ДМК ПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва, 2009

УДК 621.375.132
ББК 32.846.6
Д93

Дьяконов В. П.

Д93 Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2009. — 384 с., ил.

ISBN 978-5-94074-493-1

В книге описано современное состояние техники генерации сигналов различной формы (синусоидальных и импульсных) в широком диапазоне частот (от инфранизких до десятков ГГц) и амплитуд. Особое внимание уделено описанию серийных генераторов синусоидальных и импульсных сигналов, функциональных генераторов, генераторов с цифровым синтезом формы сигналов и генераторов сигналов произвольной формы. Приведено много примеров применения генераторов сигналов в исследовании, тестировании и отладке современной телекоммуникационной, связной и радиолокационной аппаратуры, а также в технике физического эксперимента.

Издание рассчитано на научных работников, инженеров, аспирантов, преподавателей и студентов университетов и вузов.

УДК 621.375.132
ББК 32.846.6

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

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

ISBN 978-5-94074-493-1

© Дьяконов В. П., 2009
© Оформление, ДМК Пресс, 2009

Содержание

Предисловие и обзор литературы 10

Благодарности и адреса для переписки 14

Глава 1. Генераторы синусоидальных сигналов 15

1.1. Основные типы сигналов и их параметры 15

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

1.2. Источники переменного напряжения и тока 21

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

1.3. Схемотехника аналоговых генераторов синусоидальных сигналов 26

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

1.4. Серийные RC-генераторы низких частот 43

1.4.1. Генератор сигналов низкочастотный Г3-118 43

1.4.2. Генераторы, выпускаемые фирмой МНИПИ 43

1.4.3. Генератор Г3-126 44

1.4.4. Звуковые генераторы GAG 809/810 фирмы GW Instek 45

1.5. Аналоговые ВЧ- и СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов 46

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 АКИП 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&SCHWARE 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

2.1. Импульсные сигналы и принципы их генерации 91

2.1.1. Формы и параметры импульсов 91

2.1.2. Принципы генерации импульсных сигналов 94

2.1.3. Спектр сигналов 95

2.2. Схемотехника простых генераторов импульсов 98

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

2.3. Серийные генераторы импульсов 114

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

2.4. Генераторы телевизионных сигналов 123

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

2.5. Генераторы коротких импульсов 132

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

3.1. Принципы построения функциональных генераторов 151
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

3.2. Микросхема функционального генератора XR-2206 159
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

3.3. Микросхема функционального генератора MAX038 165
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

3.4. Серийные аналоговые функциональные генераторы 168
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**A 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 АКИП 209
4.1.4. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent 210
4.1.5. Двухканальный генератор произвольных сигналов R&S AM300 212
4.1.6. Генераторы произвольных сигналов фирмы Tabor 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-