В. П. Дьяконов

# Современная генерация и генераторы

ДМК Пресс
издательство

Москва, 2011

**УДК 621.375.132**
**ББК 32.846.6**
**Д93**

**Дьяконов В. П.**

Д93 Современная генерация и генераторы / В. П. Дьяконов. — М. : ДМК Пресс, 2011. — 384 с., ил.

**ISBN 978-5-94074-709-3**

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 978-5-94074-709-3

© Дьяконов В. П., 2011
© Оформление, ДМК Пресс, 2011

# 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-