

В. П. Дьяконов

Генерация и генераторы сигналов



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, связанной 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
<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.

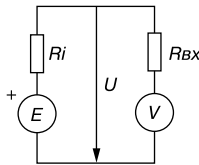


Рис. 1.2. Измерение ЭДС первичного источника напряжения постоянного тока

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 $E_э$ и эквивалентным сопротивлением $R_э$. Они могут быть найдены по известным законам и методам электротехники (например, по закону Кирхгофа, методам контурных токов или узловых потенциалов).

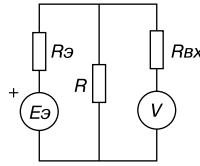


Рис. 1.3. Эквивалентная схема измерения напряжения U на резисторе R произвольной цепи постоянного тока

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 $R_{вх}$ 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:

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

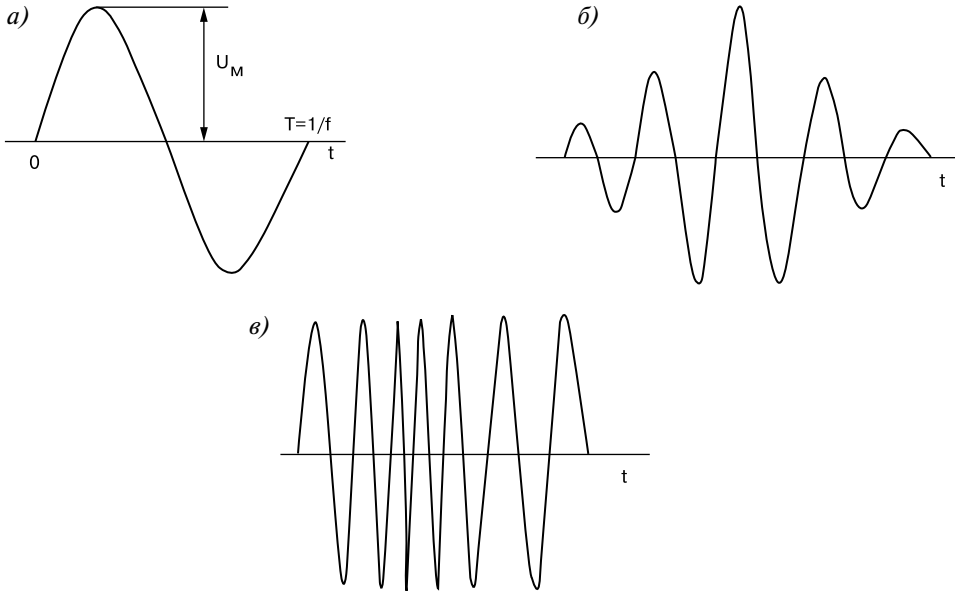


Рис. 1.4. *Временная зависимость синусоидального сигнала:*
а — один период сигнала,
б — амплитудно-модулированный сигнал,
в — частотно модулированный сигнал

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-

форматоров. Фазовый сдвиг измеряется в градусах (360° соответствуют сдвигу на период) или в радианах (2π радиан соответствуют сдвигу на период).

Поскольку все три параметра синусоидального сигнала неизменны во времени, то такие сигналы (напряжения или токи) называются *стационарными*. Если осуществляется их изменение во времени (*модуляция*), то сигналы будут *нестационарными* — см. рис. 1.4, б и 1.4, в. В большинстве случаев речь идет об измерении параметров синусоидальных сигналов или сигналов с медленно изменяющимися во времени параметрами. Это позволяет рассматривать такие сигналы как синусоидальные, хотя это и не совсем так — модулированные сигналы становятся уже не стационарными и не являются строго синусоидальными.

Временная зависимость синусоидального напряжения представлена на рис. 1.4, а. Нетрудно заметить, что напряжение плавно изменяется в пределах от $-U_M$ до $+U_M$, что создает изменение мощности во времени. Стало быть, можно говорить о мгновенной мощности

$$P(t) = u(t)i(t) = I_M^2 R \sin^2(2\pi ft + \theta) = \frac{I_M^2 R}{2} (1 + \sin(2(2\pi ft + \theta))) = \frac{U_M^2}{2R} (1 + \sin(2(2\pi ft + \theta))) \quad (1.11)$$

Она пульсирует с удвоенной частотой и достигает пиковых значений

$$P = I_M U_M = I_M^2 R = U_M^2 / R \quad (1.12)$$

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 на каждой полуволне.

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

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{I_M U_M}{2} = \frac{I_M^2 R}{2} = \frac{U_M^2}{2R}. \quad (1.13)$$

Выделяемое нагрузкой источников переменного тока тепло пропорционально активной мощности.

1.2.2. Истинное среднеквадратическое значение (True RMS)

Переменные напряжения и ток могут характеризоваться различными показателями. Например, переменное периодическое напряжение произвольной формы $u(t)$, помимо амплитудных значений, может характеризоваться:

- средним значением (постоянной составляющей) $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$;

- средневывпрямленным значением $U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$;
- эффективным или действующим значением $U_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$.

Чаще всего о действии переменного напряжения или тока судят по средней за период мощности, которая разогревает активное сопротивление R , по которому проходит переменный ток (или на которое подается переменное напряжение). Процесс нагрева инерционный, и обычно его время намного больше периода T переменного напряжения или тока. В связи с этим принято пользоваться действующим значением синусоидального напряжения и тока. В этом случае:

$$I_D = I_M / \sqrt{2} \quad \text{или} \quad U_D = U_M / \sqrt{2}. \quad (1.14)$$

Отсюда ясно, что для измерения действующего значения синусоидального напряжения или тока достаточно измерить их амплитудное значение и поделить на $\sqrt{2} = 1,414$ (либо умножить на $0,707$).

Вольтметры и амперметры переменного тока часто служат для измерения уровней переменного напряжения и тока несинусоидальной формы. При этом независимо от метода измерений они обычно градуируются в эффективных значениях синусоидального переменного напряжения или тока.

Обычно в этом случае с помощью двухполупериодного выпрямителя напряжения или тока выпрямляются и возможно измерение их средневывпрямленного напряжения (часто его называют просто средним, но это не совсем точно — см. выше). Отклонение формы переменного напряжения от синусоидальной принято учитывать коэффициентом формы:

$$k_\phi = U_D / U_{CP}. \quad (1.15)$$

Для прямоугольного сигнала (меандра) $k_\phi = 1$, а для синусоидального $k_\phi = \pi/2 \sqrt{2} = 1,1107$. Такое различие вызывает большую разницу показаний даже в этих простых случаях.

К сожалению, при измерениях напряжений и токов с различными, отличными от синусоидальных, временными зависимостями возникают определенные трудности. Они связаны с нарушением соотношений между средневывпрямленными или амплитудными значениями переменного напряжения или тока и их действующими значениями. Обычные измерители напряжений и токов с усредненными показаниями в этом случае дают недопустимо большую погрешность (рис. 1.5). Упрощенное измерение действующего значения токов порою может дать занижение до 50% истинных результатов.

При отклонении кривой измеряемого напряжения или тока от идеальной синусоидальной формы уточнение с помощью коэффициента $1,1107 \approx 1,1$ становится недопустимым. По этой причине измерители с усредненными показаниями зачастую дают неверные результаты при измерении токов в современных силовых сетях. В связи с этим

были созданы приборы, измеряющие *истинное среднеквадратическое значение* переменного напряжения и тока, которое определяется по нагреву линейного резистора, подключенного к измеряемому напряжению.


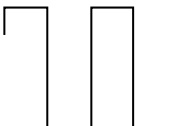

Тип измерителя	Принцип измерения	Измерение синусоиды	Измерение прямоуг. сигнала	Измерение искажённого сигн.
				
С усреднением показаний	Умножение среднего выпрямленного знач. на 1,1	Истинное	10% завышение	Завышение до 50 %
С истинно среднеквадратическими показаниями	Расчет величины теплового эффекта по среднестатистическому значению	Истинное	Истинное	Истинное

Рис. 1.5. Сравнение различных видов измерения меняющихся напряжений и токов

В наше время современные мультиметры, измеряющие истинное среднеквадратическое значение переменного напряжения или тока (не обязательно синусоидальных), обычно помечаются лейбом True RMS. В таких измерителях используются более совершенные схемы измерения, нередко со средствами микропроцессорного контроля и коррекции. Это позволило существенно повысить точность измерения и уменьшить габариты и массу приборов. Специализированные микросхемы для измерения истинных среднеквадратических значений переменных напряжений будут описаны в конце этой главы.

1.2.3. Типы источников синусоидального напряжения

Синусоидальные сигналы (см. рис. 1.4 и раздел 1.2.1) широко используются для тестирования и отладки самых разнообразных электронных устройств. Это связано с тем, что они являются простейшими, изменяющимися во времени, сигналами, но с постоянными параметрами — амплитудой, частотой и фазой. Изменение этих параметров позволяет осуществлять модуляцию синусоидальных сигналов и использовать их для переноса информации. На этом основаны многочисленные сферы применения синусоидальных сигналов в технике электросвязи и радиотехнике.

Источниками синусоидальных сигналов могут быть струны музыкальных инструментов, камертоны, катушки, вращающиеся в постоянном магнитном поле, и другие устройства. Далее мы рассмотрим только электронные генераторы электрических и радиотехнических сигналов в виде переменных токов и напряжений.

В измерительной технике применяются несколько основных типов таких источников — *генераторов синусоидального напряжения*:

1. Низкочастотные RC -генераторы.
2. Высокочастотные LC -генераторы.
3. Генераторы с пьезокристаллическими, кварцевыми и электромеханическими резонаторами.
4. Генераторы, формирующие синусоидальные сигналы из треугольных сигналов путем их плавного ограничения.
5. Генераторы, реализующие цифровые методы синтеза синусоидальных сигналов.

Вплоть до 60-х годов ушедшего XX века генераторы синусоидального напряжения строились почти исключительно первых трех типов. Но затем развитие микроэлектроники и появление высококачественных аналоговых компонентов (прежде всего, интегральных операционных усилителей) привело к широкому распространению функциональных генераторов, составивших основу генераторов четвертого типа. В 70–80-е годы бурное развитие цифровой и вычислительной техники привело к разработке и освоению массового производства генераторов пятого типа, основанных на цифровых методах синусоидальных и многих других (в том числе произвольных) видов сигналов.

1.2.4. Фазовый шум генераторов

Реальные сигналы характеризуются шумовыми составляющими амплитуды и фазы, вызванными их случайными флуктуациями. В технике генерации синусоидальных сигналов особое значение имеет *фазовый шум* генераторов, создаваемый случайными флуктуациями частоты или фазы сигнала. На высоких и, особенно, сверхвысоких частотах он ведет к паразитной фазовой и частотной модуляции, расширению спектра сигналов и, порою, невозможности применения сигналов в трактах радиосвязи.

Обычно уровень фазовых шумов источника синусоидальных сигналов измеряется спектральным методом, при котором уровень шума при отстройке от несущей на частоту f_m оценивается выражением [120]:

$$L(f_m) = P_0 - \left[P_{\text{noise}, f_m} - 10 \cdot \log \frac{B_{\text{noise}}}{\Gamma_{\text{ц}}} + D_{\text{кorr}} \right], \quad (1.16)$$

где P_0 — мощность несущей сигнала, P_{noise, f_m} — мощность фазовых шумов при отстройке по частоте f_m , B_{noise} — шумовая полоса узкополосного фильтра анализатора, $D_{\text{кorr}}$ — коэффициент коррекции.

Этот метод имеет ряд достоинств:

- легкая и быстрая подготовка к измерениям;
- широкий диапазон отстроек — от 10 Гц до 1 ГГц;
- параллельное измерение уровня гармоник, побочных излучений и уровня просачивания мощности в соседние каналы;

- прямые измерения уровня фазовых шумов при незначительном уровне амплитудных шумов.

Однако есть и ряд недостатков этого метода:

- невозможность разделения фазовых и амплитудных шумов;
- ограничение динамического диапазона измерений уровнем собственных шумов опорного генератора и тепловыми шумами прибора;
- невозможность измерения фазовых шумов при малых расстройках (менее 10 Гц) из-за просачивания несущей в полосу пропускания анализатора.

Для высокоточного контроля источников сигналов некоторые фирмы выпускают специализированные анализаторы спектра, называемые *анализаторами источников сигналов*. От обычных анализаторов спектра они отличаются возможностью не только анализа спектра сигналов, но и измерения низких уровней фазовых шумов источников сигналов. *Анализаторы сигналов* объединяют два прибора — анализатор спектра высокого класса и анализатор источников сигналов.

Недостатки измерения фазового шума спектральным методом отсутствуют у метода, основанного на применении фазового детектора с вырезанием несущей. У этого метода на фазовый детектор подаются два сигнала — исследуемый и высокостабильный опорный. Равенство частот сигналов обеспечивается схемой фазовой автоподстройки частоты. При малых отклонениях фазы измеряемого сигнала сигнал на выходе фазового детектора оказывается пропорциональным изменению фазы исследуемого сигнала. Детали реализации этого метода можно найти в статье [123]. Этот метод реализован в современных анализаторах сигналов фирмы R&S.

1.3. Схмотехника аналоговых генераторов синусоидальных сигналов

1.3.1. Обобщенная схема аналогового генератора синусоидального напряжения

Основы построения генераторов синусоидальных сигналов можно найти в любом учебнике по радиотехнике. Многие типы генераторов синусоидальных сигналов строятся по обобщенной схеме, показанной на рис. 1.6. Основой генератора является частотно-избирательная цепь (ИЦ) и усилитель $У$, охваченные через цепь обратной связи (ЦОС) обратной связью. В качестве ИЦ могут использоваться RC -цепи, колебательные LC -контурные, кварцевые и пьезоэлектрические резонаторы и т. д. Разумеется, предполагается, что усилитель питается от источника электрической энергии, обычно источника постоянного напряжения.

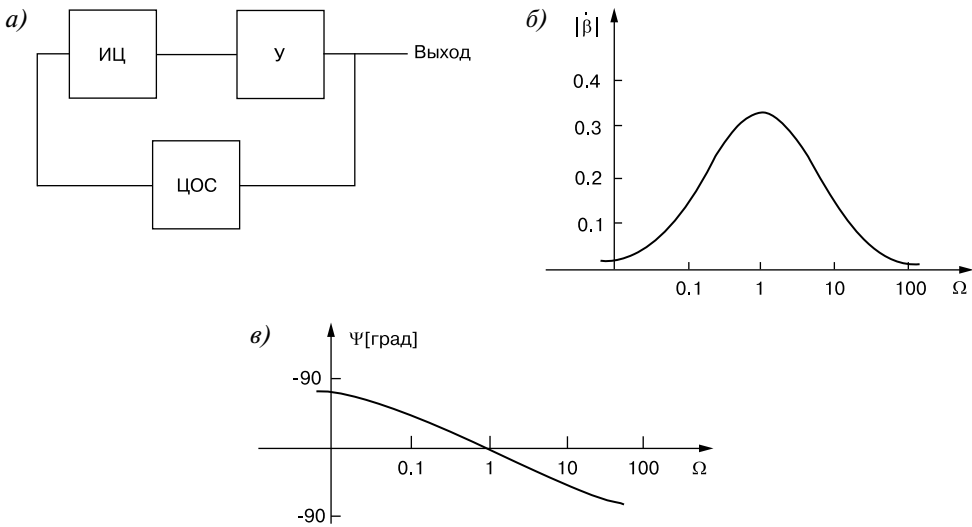


Рис. 1.6. Обобщенная схема генератора синусоидальных колебаний (а), АЧХ избирательной цепи (б) и ее ФЧХ (в)

Избирательная цепь как четырехполюсник характеризуется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и фазочастотной характеристикой (ФЧХ), которые в нормированном по частоте ($\Omega=f/f_0$) виде показаны на рис. 1.6, б и 1.6, в.

Моделирование и теоретический анализ показывают, что цепь (рис. 1.6) при указанных выше ИЦ описывается дифференциальным уравнением второго порядка, которое в случае линейности цепи имеет решение в виде стационарных, нарастающих или спадающих по амплитуде синусоидальных колебаний. Это верно, если скорость нарастания или спада достаточно мала. На этом основан метод медленноменяющихся амплитуд, широко используемых при анализе генераторов синусоидальных колебаний.

Колебания в системе (рис. 1.6, а) возникают при двух одновременно выполняемых условиях:

- баланса фаз — на частоте колебаний общий фазовый сдвиг должен быть равен 0 или кратен 2π (это означает, что обратная связь в системе (рис. 1.6) должна быть положительной на частоте генерации);
- баланса амплитуд — петлевой коэффициент передачи на частоте колебаний должен быть равен 1 или несколько превышать 1 (при равенстве 1 наступает генерация стационарных колебаний с неизменной амплитудой).

Если усилитель имеет нестабильный фазовый сдвиг, то на частоте генерации он должен быть скомпенсирован фазовым сдвигом ИЦ, а это означает смещение частоты относительно значения f_0 , при котором фазовый сдвиг ИЦ полагается равным 0. Таким образом, фазовая стабильность усилителя (и ИЦ) является показателем стабильности частоты возникающих колебаний.

До сих пор предполагалось, что усилитель U и ИЦ линейны или по крайней мере работают в линейном режиме. Однако в этом случае условие баланса амплитуд оказывается чисто теоретической абстракцией. Малейшее изменение его приведет либо к затуханию амплитуды колебаний, либо к ее неограниченному росту.

Здесь мы сталкиваемся со случаем, когда нелинейность усилителя полезна. Обычно коэффициент усиления нелинейного усилителя уменьшается по мере роста амплитуды сигнала на его выходе. Так что если условие баланса при малой амплитуде нарушено (петлевой коэффициент передачи больше 1), то колебания на выходе устройства (рис. 1.6, *a*) будут нарастать по амплитуде, что приведет к уменьшению коэффициента усиления усилителя. В конце концов, при некоторой амплитуде выходного сигнала петлевой коэффициент передачи станет равным точно 1 и наступит баланс амплитуд. Это соответствует установившемуся режиму работы генератора.

Уместно отметить, что усилитель вносит в ИЦ изменения ее параметров, так что частота колебаний может несколько отличаться от значений f_0 при идеальной ИЦ. Это тоже может быть источником нестабильности частоты.

В зависимости от выбранных ИЦ, U и ЦОС возможно построение множества схем автогенераторов — генераторов, в которых синусоидальные колебания возникают автоматически. RC -генераторы не требуют громоздких LC -контуров и легко реализуются в диапазоне частот от Гц до десятка МГц. Однако RC -цепи имеют низкую избирательность и плохо фильтруют гармоники сигнала, что ведет к заметным нелинейным искажениям и невысокой стабильности частоты.

Коэффициент нелинейных искажений НЧ-сигналов оценивается величиной:

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1.17)$$

где U_i — напряжение i -ой гармоники сигнала. Он может достигать нескольких процентов у простых схем RC -генераторов и до тысячных долей процента у ГСС низких частот. Для получения малого K_r нужно применение высококачественных линейных усилителей и тщательное проектирование системы ограничения и стабилизации амплитуды синусоидальных сигналов. Хотя существует немало измерителей нелинейных искажений, при массовых измерениях полезно применение анализаторов спектра, ныне встроенных в большинство цифровых осциллографов.

Интересная подборка схем автогенераторов (увы, без какого-либо описания) приведена в Интернете по адресу: <http://zpostbox.narod.ru/g1.htm>. (в 4 частях).

1.3.2. RC -генераторы

RC -генераторы используются для генерации сверхнизких и низких частот, а также радиочастот примерно до 2–5 МГц [133]. Как правило, модуляция у таких генераторов не используется — за исключением некоторых моделей с частотой генерируемых сигналов выше 100 кГц.

На рис. 1.7 показана одна из типовых схем RC -генераторов с Γ -образной ИЦ, образованной последовательной ($R_1 C_1$) и параллельной ($R_2 C_2$) RC -цепями. АЧХ и ФЧХ именно этой цепи показаны на рис. 1.6, б) и 1.6, в). На частоте генерации такая цепь имеет угол сдвига фазы, равный 0. При приведенных на рис. 1.7 данных, схема рассчитана на генерацию фиксированной частоты в 1 000 Гц, задаваемой с высокой точностью.

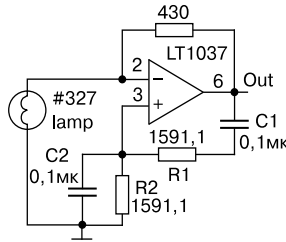


Рис. 1.7. Типичная схема RC -генератора на операционном усилителе

Обычно в параллельной и последовательной RC -цепочках номиналы резисторов и конденсаторов попарно равны ($R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$), и частота генерации равна:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.18)$$

В этом случае цепь положительной обратной связи на частоте f_0 вносит ослабление

$$1 + (R_1 / R_2) + (C_1 / C_2), \quad (1.19)$$

равное 3 при $R_1 = R_2$ и $C_1 = C_2$. Для получения синусоидальных колебаний вводится цепь отрицательной обратной связи, которая должна обеспечивать усиление усилителя на уровне чуть больше 3 (условия баланса амплитуд).

Стабилизация амплитуды сигнала на выходе достигается за счет нелинейности усилителя. С ростом амплитуды сигнала на выходе усилителя его коэффициент усиления падает, и при некоторой амплитуде устанавливается баланс амплитуд. Наступает стационарный режим генерации почти синусоидальных колебаний.

Лучшие результаты дает применение дополнительной *инерционной отрицательной обратной связи* с применением в ее цепи маломощной миниатюрной лампы накаливания. При повышении амплитуды сигнала на выходе нить накаливания разогревается, и омическое сопротивление ее возрастает. В результате глубина отрицательной обратной связи возрастает, что приводит к уменьшению амплитуды сигнала и, в конечном счете, стабилизирует ее. Как отмечалось, такой способ стабилизации не ведет к заметным искажениям формы синусоиды, поскольку для быстроизменяющегося сигнала отрицательная обратная связь остается линейной. Данный способ стабилизации амплитуды широко используется в генераторах *стандартных НЧ-сигналов*. Используются также электронные способы ограничения амплитуды сигнала на выходе генератора.

Перестройка по частоте плавно в подобном генераторе часто осуществляется спаренным прецизионным резистором. Для грубого изменения частоты (обычно с кратностью 10) используется изменение емкости конденсаторов с помощью переключателя.

Более дорогой является перестройка с помощью воздушного или пленочного двоянного конденсатора переменной емкости. Она сопровождается меньшим шумом при изменении частоты и применяется в высококачественных ГСС низких частот. Часто вполне подходящим для такой перестройки является двоянный или строенный конденсатор переменной емкости от радиоприемников. К сожалению, это довольно громоздкий узел. Кроме того, при применении такого конденсатора шкала частот получается сильно неравномерной. Грубое изменение частоты в этом варианте генератора осуществляется переключением резисторов.

Как видно из рис. 1.6, б и 1.6, в, АЧХ и ФЧХ ИЦ в данном генераторе довольно пологие. Это говорит о том, что стабильность частоты не может быть высокой. Это характерно практически для всех известных схем RC -генераторов синусоидального (или почти синусоидального) напряжения. Главные достоинства таких генераторов заключаются в отсутствии катушек индуктивности, сложных в изготовлении и громоздких, а также в широком перекрытии частоты при ее изменении изменением R или C .

1.3.3. LC -генераторы синусоидального напряжения

На высоких частотах (от десятков кГц до сотен МГц и выше) применяются LC -генераторы на основе высокодобротных LC -контуров. Частота контура (последовательного или параллельного), на которой фазовый сдвиг равен 0, обычно очень близка к *резонансной частоте* идеального последовательного LC -контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1.20)$$

Заметим, что на этой частоте и реактивное сопротивление катушки индуктивности L равно по модулю реактивному сопротивлению конденсатора C , что в последовательном контуре ведет к их взаимной компенсации, так что результирующее сопротивление контура падает до минимальной величины, равной последовательному сопротивлению потерь r . Сопротивление параллельного контура, напротив, на резонансной частоте становится большим и также активным.

Отсюда следует возможность изменения частоты LC -генератора изменением емкости C или индуктивности L . Для этого используются конденсаторы переменной емкости и катушки переменной индуктивности — *вариометры* (реже). Выпускаются также переменные конденсаторы на основе p - n -перехода (*варикапы*), емкость которых управляется напряжением. Их применение позволяет строить генераторы, управляемые напряжением.

Фильтрующая способность LC -контура определяется его добротностью Q — отношением реактивного сопротивления элементов L или C к активному сопротивлению потерь r контура. Значения Q у радиочастотных контуров составляют несколько десятков и даже сотен. При этом Q определяет и полосу частот контура $\Delta f = f_0/Q$. Очевидно, что чем выше Q , тем более стабильна частота генератора. Стабильность частоты LC -

генераторов на 1–2 порядка выше, чем у RC -генераторов. Но относительная нестабильность частоты редко получается меньшей 10^{-4} .

Благодаря высокой фильтрующей способности колебательных LC -контуров получение синусоидальной формы от LC -генераторов оказывается более простой задачей, чем в случае построения RC -генераторов. Однако и тут простые схемы могут давать K_T до нескольких процентов. Часто вместо K_T чистоту спектра ВЧ генераторов оценивают просто по уровню гармоник сигнала. Он обычно измеряется в логарифмических единицах — *децибелах*. Для отношения напряжений:

$$\text{дБ} = 20 \log \left(\frac{U_2}{U_1} \right), \quad (1.21)$$

где U_1 — исходное напряжение, U_2 — измеряемое напряжение. Нетрудно убедиться в том, что 6 дБ соответствует отношению 2, 20 дБ — 10, 40 дБ — 100 раз и т. д. Децибелы положительны, если $U_2 > U_1$, и отрицательны, если $U_2 < U_1$. Нередко в децибелах отражают абсолютный уровень переменного напряжения — относительно U_1 с амплитудой 1 В (или эффективным значением 0,707 В). Впрочем, иногда за 0 дБ берут и другие уровни напряжения — например, в милливольтметрах ВЗ-48 это 0,775 В.

Для мощности вводится логарифмическая единица — *децибелы мощности*

$$\text{дБм} = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right), \quad (1.22)$$

При записи их множителя учитывают квадратичную зависимость мощности от напряжения или тока.

Классическая схема автогенератора на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, представлена на рис. 1.8. Частота генерации задается параллельным LC -контуром. Каскад с общей базой не инвертирует фазу, поэтому для создания положительной обратной связи достаточно подать сигнал с части контура на эмиттер транзистора. Эта схема (при использовании соответствующего транзистора и контура) может работать на частотах от десятков кГц до сотен МГц и выше. Поскольку входное сопротивление каскада с общей базой мало, то необходимо согласование между высокоомной выходной цепью усилителя и его низкоомной входной цепью. Оно и достигается неполным включением контура.

Еще одна классическая схема LC -генератора показана на рис. 1.9. Здесь используется каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель), который тоже не инвертирует фазу входного сигнала, но имеет коэффициент передачи несколько меньший 1. Поэтому для соблюдения условия баланса амплитуд надо использовать повышающее напряжение автотрансформаторное включение колебательного контура.

Заметим, что каскад с общим коллектором, как и каскад с общей базой, имеют наилучшие частотные свойства, чем каскад с общим эмиттером. Это гарантирует устойчивую работу автогенератора на высоких частотах.

Множество генераторов создано на основе каскада с общим эмиттером, дающего, как известно, наибольшее усиление по мощности. Однако, эта схема каскада не очень

удачна для построения генераторов из-за намного худших частотных свойств биполярного транзистора в ней, по сравнению с предыдущими схемами его включения. Подобные автогенераторы строятся и на полевых транзисторах по схеме с общим истоком, достоинством которых является высокое входное сопротивление.

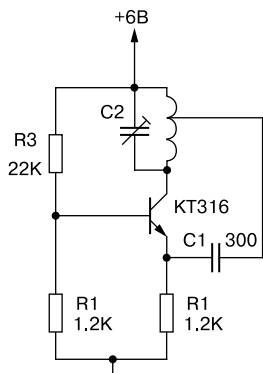


Рис. 1.8. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, и контуре с неполным включением

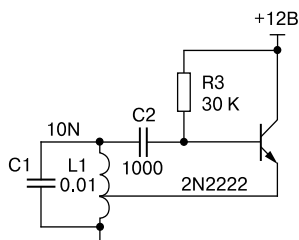


Рис. 1.9. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором с автотрансформаторным включением контура

Тем не менее, классические схемы транзисторных автогенераторов имеют определенные недостатки. Основным из них является необходимость в согласовании импедансов входной и выходной цепей каскадов и LC-контура. Это и приводит к необходимости автотрансформаторного включения контура или к применению отдельной катушки связи. В связи с этим было создано множество оригинальных схем автогенераторов, в которых контур используется без отводов от катушки индуктивности и без дополнительных катушек связи, усложняющих реализацию контуров и затрудняющих их коммутацию в многодиапазонных генераторах.

Тут уместно отметить ряд оригинальных схем, основанных на внесении в контур отрицательного сопротивления или проводимости, которые компенсируют сопротивление потерь контура и ведут к возникновению в нем незатухающих колебаний. Несмотря на безусловную полезность и оригинальность таких генераторов, широкого практического применения они все же не получили. Прежде всего потому, что нужные для этого специальные приборы — *негатроны* (лавинные транзисторы, туннельные

диоды, однопереходные транзисторы и др.) распространены намного реже, чем обычные биполярные и полевые транзисторы, и, как правило, стоят дороже их и плохо реализуются в микроэлектронном исполнении.

На рис. 1.10 показана схема LC -генератора на основе каскада с общим истоком на полевом транзисторе и каскада с общим эмиттером на биполярном транзисторе. Это сочетание полезно тем, что первый каскад имеет очень высокое входное сопротивление, а второй — высокое выходное сопротивление. Подключение выхода второго каскада на вход первого каскада создает положительную обратную связь, а роль ИЦ играет полностью включенный LC -контур.

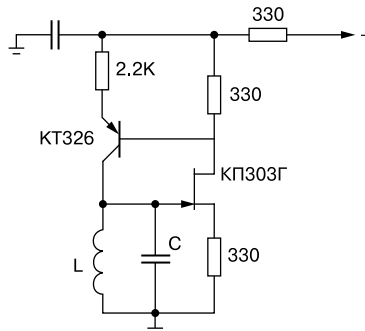


Рис. 1.10. Генератор с полным включением LC -контура на полевом и биполярном транзисторах

На рис. 1.11 представлена схема автогенератора на двухзатворном полевом транзисторе (тетраде) [132]. Это классическая схема LC -генератора на основе каскада с общим стоком, но в цепь стока включен резистор для создания выходного сигнала. Полевой тетрод имеет малую входную емкость, что позволило обеспечить широкий диапазон регулировки по частоте с помощью варикапа ВВ112. Диапазон перестройки лежит в пределах от 7 до 40 МГц.

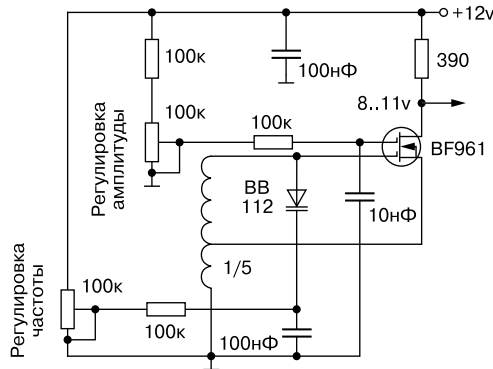


Рис. 1.11. Генератор на полевом транзисторе с электронной перестройкой частоты от 7 до 40 МГц

В приведенных схемах используется параллельный LC -контур. Есть и схемы автогенераторов с последовательными LC -контурами, хотя они распространены меньше. В любых схемах для повышения стабильности частоты желательно предельно ослабить влияние на колебательный контур внешней цепи (усилителя или активного прибора). Как и при построении RC -генераторов иногда вводятся цепи электронной стабилизации амплитуды.

Широкое распространение получили LC -генераторы с электронной настройкой с помощью варикапов — диодов на основе p - n -переходов, емкость которых меняется с изменением управляющего напряжения (см. пример на рис. 1.11). Применяются и генераторы с катушкой контура на ферритовом сердечнике, частота которых в широких пределах меняется подмагничиванием феррита с помощью электромагнита. В измерительных генераторах часто используется и электронная автоподстройка частоты. Наиболее популярной является фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ). Она будет описана в этой главе чуть ниже.

1.3.4. Генераторы на пьезокерамических фильтрах

Колебательная система автогенератора вовсе не обязательно должна быть LC -контуром. Возможно применение пьезокерамических фильтров, кварцевых резонаторов и даже камертонов с электромагнитами. На рис. 1.12 показаны две схемы автогенераторов с пьезокерамическими фильтрами, обычно предназначенными для применения в усилителях промежуточной частоты супергетеродинных радиоприемников.

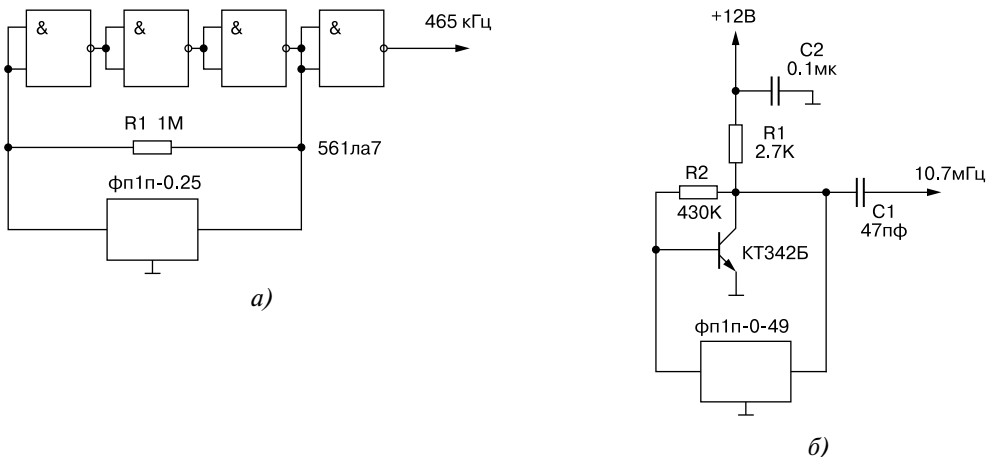


Рис. 1.12. Автогенераторы на основе пьезокерамических фильтров на частоту 465 кГц (а) и 10,7 МГц (б)

Такие фильтры выпускаются в больших количествах, они дешевы и доступны. Фильтры обладают свойством инвертирования входного сигнала и потому для получения

положительной обратной связи надо использовать инвертирующий усилитель. В генераторе на рис. 1.12, *а* усилитель построен на основе ТТЛ-схем, а в генераторе на рис. 1.12, *б* — на биполярном транзисторе.

Добротность пьезокерамических фильтров как резонаторов выше добротности *LC*-контура. Поэтому генераторы имеют более высокую стабильность частоты, но уступающую стабильности частоты кварцевых генераторов (см. ниже).

1.3.5. Кварцевые резонаторы и генераторы

Генераторы с кварцевой стабилизацией (или *кварцевые генераторы*) используют в качестве ИЦ пьезоэлектрический резонатор в виде пластины из кварца с металлизированными поверхностями. Ныне ряд фирм выпускает такие резонаторы на частоты от нескольких килогерц до сотен мегагерц (см. рис. 1.13). Но наиболее распространены кварцевые резонаторы с частотами от десятков килогерц до десятков мегагерц.

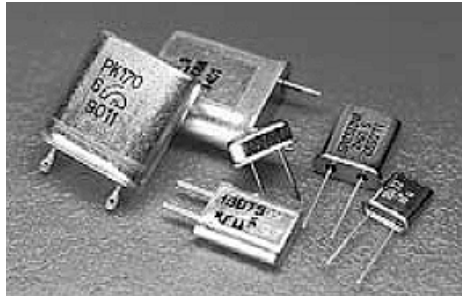


Рис. 1.13. Отечественные кварцевые резонаторы в разных корпусах

Размеры кварцевого резонатора возрастают с уменьшением частоты их резонанса. Наивысшую стабильность частоты имеют кварцевые резонаторы, размещенные в корпусе с глубоким вакуумом. Высокочастотные резонаторы часто используются в схемах умножения частоты.

Благодаря обратному пьезоэффекту кварцевая пластина колеблется при приложении к ней переменного напряжения. Если частота его приближается к частоте механического резонанса, то амплитуда механических колебаний резко усиливается, и благодаря прямому пьезоэффекту в кварце возникает электрическое поле, усиливающее ток, протекающий через кварцевую пластину. При этом резонатор ведет себя как последовательный *LCR*-контур очень высокой добротности Q — до нескольких миллионов. С учетом собственной емкости обкладок пластин C_0 эквивалентная схема *кварцевого резонатора* приобретает вид, показанный на рис. 1.14, *а*.

Как видно из рис. 1.14, *а*, резонанс кварца может быть обусловлен как последовательным, так и параллельным эквивалентным колебательным контуром. Расчеты показывают, что резонансные частоты очень близки, но все же немного различаются. Выпускаются кварцы, у которых частота резонанса ориентирована на последователь-

ный или параллельный резонанс, что надо учитывать как при выборе резонатора, так и схемы генератора.

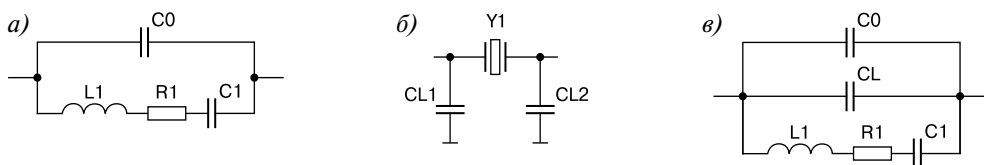


Рис. 1.14. Эквивалентные схемы кварцевого резонатора: обычная (а), установленного на печатную плату (б) и полная (в)

При установке кварцевого резонатора на печатную плату надо учитывать емкости монтажа (нагрузки) $CL1$ и $CL2$ (рис. 1.14, б). В результате эквивалентная схема кварцевого резонатора приобретает вид, показанный на рис. 1.14, в.

Частоты последовательного f_s и параллельного f_p резонансов кварцевого резонатора равны:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} \quad \text{и} \quad f_p = f_s \sqrt{1 + \frac{C1}{C0 + CL}}. \quad (1.23)$$

При этом $f_p > f_s$. В паспортных данных на кварцевые резонаторы обычно указываются частота параллельного резонанса и емкость нагрузки. С помощью формулы для f_p нетрудно оценить отклонение частоты параллельного резонанса от паспортного значения при несоответствии емкости CL ее номинальному значению. Меняя емкость нагрузки CL , можно в некоторых (очень небольших) пределах менять частоту резонанса кварцевого резонатора.

Благодаря прекрасной стабильности механических свойств кварцевого резонатора и высокой добротности его эквивалентных контуров типовая нестабильность частоты кварцевых автогенераторов составляет 10^{-5} - 10^{-4} , а для кварцевых резонаторов, размещаемых в термостатах, даже 10^{-8} - 10^{-6} . По этому параметру кварцевые генераторы намного превосходят все другие, за исключением уникальных молекулярных и лазерных генераторов, знакомых только специалистам по метрологии.

Свойства кварцевых резонаторов, в частности температурный дрейф их резонансной частоты, зависят от углов среза пластины в кристалле кварца относительно кристаллографических осей (рис. 1.15). При определенных углах среза можно получить близкий к нулю температурный дрейф (срез типа ВТ), но в пределах небольшой области температур, например $20 \pm 5^\circ \text{C}$ или $60 \pm 5^\circ \text{C}$. Кварцевые резонаторы с таким температурным диапазоном часто помещаются в термостаты и используются для построения вторичных эталонов частоты. Существует несколько видов срезов кварцевых пластин, от них зависят размеры пластин и тип их колебаний.

Кварцевые резонаторы типа ВТ применяются в термостабилизированных генераторах. Их нестабильность достигает значения порядка 10^{-6} , что достаточно для многих применений таких генераторов. При других срезах для повышения стабильности частоты применяются термостатируемые кварцевые резонаторы или в целом генераторы.

Термостат должен обеспечивать стабильность температуры порядка $0,001-0,1^\circ\text{C}$, что возможно при тщательном его проектировании.

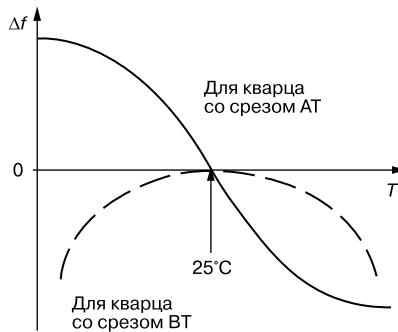


Рис. 1.15. Температурные зависимости частоты для кварцевых резонаторов с различным типом среза

Четверть века назад кварцевый генератор в аппаратуре считался особым шиком и применялся в сравнительно дорогих измерительных приборах для их калибровки по частоте. Но в наше время кварцевые резонаторы доступны и выпускаются в огромной номенклатуре. Так что, если нужен простой генератор на фиксированную частоту, то его нередко проще построить на миниатюрном кварцевом резонаторе, чем на более громоздком и куда более нестабильном LC -контуре. Впрочем, не стоит забывать, что высокостабильный кварцевый резонатор стоит заметно дороже, чем LC -контур.

Кварцевые генераторы — это устройства с кварцевыми резонаторами. Они могут работать на частотах параллельного или последовательного резонансов, либо на частотах, кратных им. Обобщенная схема такого генератора соответствует рис. 1.6, а, где в качестве ИЦ используется кварцевый резонатор или фильтр.

В качестве усилителя наиболее часто применяются логические микросхемы, триггеры Шмитта, операционные усилители, различные каскады на биполярных и полевых транзисторах. На рис. 1.16 показано несколько схем кварцевых генераторов, выполненных на логических микросхемах.

Кварцевые генераторы на логических микросхемах обычно генерируют несинусоидальное напряжение. Оно скорее близко к прямоугольным импульсам. Однако такие генераторы автоматически согласуются по уровням сигнала со стандартными интегральными схемами и могут применяться для работы с ними, например, в качестве тактовых генераторов. Для понижения частоты могут использоваться цифровые делители частоты, которые имеются практически во всех сериях логических микросхем.

Генераторы на логических микросхемах могут обеспечить нестабильность частоты порядка $10^{-5}-10^{-4}$, что на 1–2 порядка хуже, чем нестабильность частоты обычного кварцевого генератора синусоидального сигнала. Причина этого заключается в большом влиянии на параметры кварцевого резонатора (особенно на его добротность) довольно нестабильных параметров схемы резко нелинейного усилителя, в роли которого выступают логические схемы.

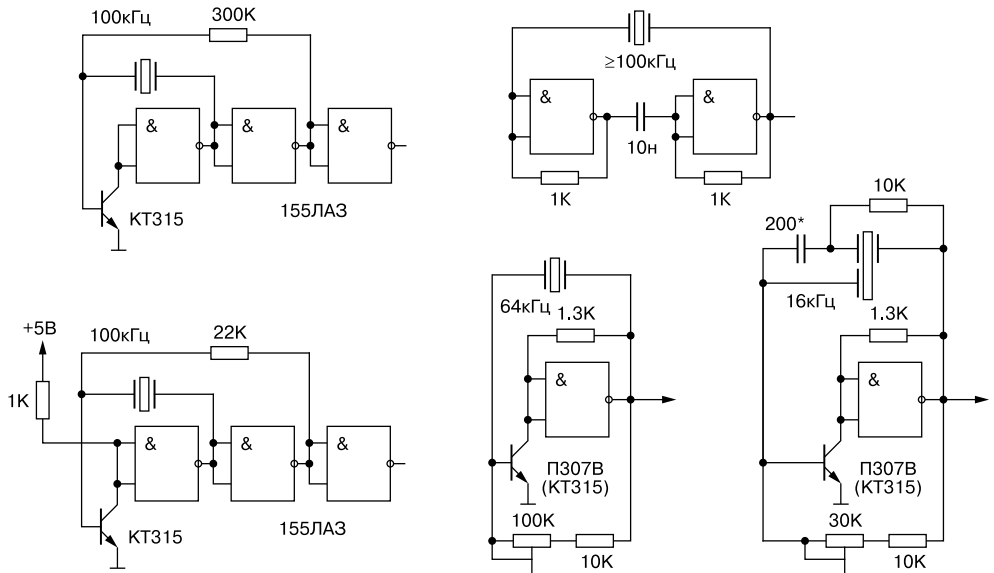


Рис. 1.16. Схемы кварцевых генераторов на логических микросхемах

Достаточно часто в схемах низкочастотных кварцевых генераторов используются и операционные усилители. Схема, показанная на рис. 1.17, использует питание операционного усилителя от одного источника питания, что упрощает построение таких схем.

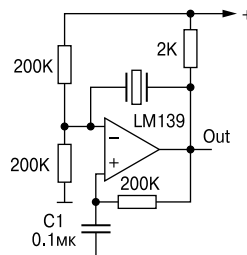


Рис. 1.17. Схема кварцевого генератора на интегральном операционном усилителе

Ныне операционные усилители выпускаются практически на любые частоты, которые могут генерировать кварцевые резонаторы. Однако высокочастотные усилители достаточно дороги, что ограничивает их применение в кварцевых генераторах.

Биполярные транзисторы по-прежнему являются наиболее приемлемыми для построения схем кварцевых генераторов, вследствие их дешевизны (нередко они стоят несколько рублей или центов) и достаточной высокочастотности (частоты в сотни МГц). Это делает построение кварцевых генераторов на них экономически более оправданным, чем на интегральных микросхемах.

На рис. 1.18 показана типичная схема кварцевого генератора на биполярном транзисторе. Благодаря настройке контура на пятую гармонику кварца с частотой 5,6 МГц

генерируется частота 28 МГц. Разумеется, подобную схему можно использовать и для генерации на других гармониках, в том числе и на первой.

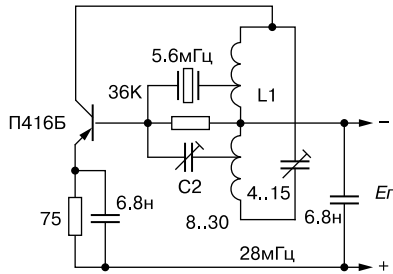


Рис. 1.18. Схема кварцевого генератора на биполярном транзисторе, работающая на пятой гармонике кварцевого резонатора

В литературе, особенно радиоловительской, можно найти огромное число схем кварцевых автогенераторов.

1.3.6. Промышленные модули кварцевых генераторов

Выпускаются и модули кварцевых генераторов. Это законченные устройства, выполненные в герметичных корпусах, предназначенных для монтажа на печатную плату. Фирма "Платан" (www.platan.ru) предлагает на нашем рынке серию модулей кварцевых генераторов двух типов, показанных на рис. 1.19.



Рис. 1.19. Модули кварцевых генераторов

Эти модули строятся на микросхемах TTL и МОП, есть и варианты с электронной подстройкой частоты. Модули покрывают диапазоны частот от 1 до 100 МГц. Напряжение питания модулей 5 В. Модули типа 1 рассчитаны на фиксированные частоты, они имеют три задействованных выхода (общий, питания и выход). В модулях типа 2 имеется дополнительный вход для управляющего напряжения.

1.3.7. Пути улучшения параметров генераторов синусоидальных сигналов

Измерительные аналоговые генераторы, в том числе генераторы стандартных сигналов (ГСС), требуют принятия определенных мер по стабилизации частоты и амплитуды синусоидального сигнала и уменьшению его искажений. Кроме того, нередко требуется обеспечение довольно широкого диапазона изменения частоты.

Низкочастотные (звукового и ультразвукового диапазонов частот) аналоговые измерительные генераторы строятся на основе трех основных типов:

- генераторы на биениях, содержащие два LC -генератора (один с фиксированной частотой, другой с плавно изменяющейся) и смеситель для выделения разностной частоты;
- генераторы на основе избирательной RC -цепи того или иного типа (RC -генераторы);
- генераторы на основе преобразователей треугольного напряжения в синусоидальный сигнал (аналоговые функциональные генераторы).

Первый тип генераторов был довольно известен еще в 50–60-х годах прошлого века. Однако его главный недостаток — низкая стабильность разностной частоты (особенно самой низкой) преодолеть не удалось и выпуск таких генераторов повсеместно был прекращен. Основное достоинство (а часто недостаток) таких генераторов — перекрытие всего диапазоны частот (например, от 20 Гц до 20 кГц) без разбивки его на поддиапазоны. Это до сих пор используется в генераторах качающейся частоты, причем не только низкочастотных, но и высокочастотных.

Основным типом НЧ-генераторов стали описанные выше RC -генераторы. Как отмечалось, их стабильность примерно на порядок хуже стабильности LC -генераторов. Не вдаваясь слишком далеко в теорию автогенераторов, все же отметим, что стабильность их частоты зависит от параметра $Q = f_0 / 2\Delta f$ — добротности избирательной цепи ИЦ, где $2\Delta f$ — *полоса пропускания*, оцениваемая по спаду резонансной кривой на 3 дБ по обе стороны от частоты резонанса f_0 (или квазирезонанса для RC -цепей). Чем выше добротность и меньше полоса пропускания, тем меньше изменяется частота генерации, на которой соблюдаются условия баланса фаз и амплитуд. Изменение частоты может быть обусловлено также изменением фазы усилителя или ИЦ вследствие изменения температуры, напряжения питания и иных факторов.

У избирательных RC -цепей $Q < 1$ и это указывает на из принципиально высокую нестабильность частоты. Определенные проблемы вызывает стабилизация амплитуды синусоидальных колебаний у таких генераторов при одновременном снижении времени установления амплитуды с заданной точностью. В этом случае описанная выше инерционная обратная связь с помощью термистора или лампы накаливания оказывается недостаточно эффективной из-за больших постоянных времени изменения сопротивления этих приборов. Генераторы приходится усложнять введением электронной стабилизации амплитуды выходного сигнала. Однако в этом случае труднее получить малые коэффициенты нелинейных искажений.

Аналоговые функциональные генераторы обеспечивают широкий диапазон перестройки по частоте, возможность электронного управления частотой и малое время установки амплитуды при перестройке частоты сигналов. Однако они имеют серьезный недостаток — высокий коэффициент нелинейных искажений. Поэтому полноценную замену RC -генераторов функциональные генераторы не обеспечивают.

У резонансных LC -контуров Q лежит в пределах от нескольких десятков до сотен. Так что по стабильности частоты LC -автогенераторы, как правило, намного превосходят RC -генераторы. Однако для получения высокой стабильности частоты нужны соответствующие конструктивные меры, например применение катушек индуктивности с обмоткой, полученной вжиганием серебра в керамический каркас или изготовление обмотки методом электролитического осаждения серебра. Помимо этого используются и другие методы улучшения стабильности частоты LC -генераторов. Они сводятся:

- к выбору высокостабильных компонентов — индуктивностей L и конденсаторов C ;
- применению температурной компенсации, когда, к примеру, положительный температурный коэффициент изменения индуктивности компенсируется отрицательным температурным коэффициентом емкости конденсатора;
- применение термостатов обеспечивающих постоянство рабочей температуры как в целом генератора, так и его резонаторов (например, кварца или LC -контюра);
- использованию схем автоматической подстройки частоты;
- применению буферных усилительных каскадов (эмиттерных повторителей, каскадов на полевых транзисторах с высоким входным сопротивлением, усилителей на широкополосных операционных усилителях и др.).

Большинство аналоговых измерительных LC -генераторов строится на основе схемы LC -генератора с буферным резонансным каскадом. Применение такого каскада резко снижает искажения формы сигнала из-за его ограничения в LC -генераторе и уменьшает влияние на LC -генератор нагрузки. Кроме того, это позволяет легко модулировать сигнал по амплитуде изменением напряжения питания буферного усилителя. Как правило, применяются и цепи автоматической стабилизации уровня выходного напряжения путем сравнения выпрямленного напряжения сигнала с опорным постоянным напряжением, усиление их разности и воздействием ее на регулирующий элемент, изменяющий напряжение питания буферного каскада [133]. Изменение опорного напряжения по закону НЧ модулирующего сигнала позволяет легко осуществлять амплитудную модуляцию с достаточно линейной модуляционной характеристикой.

Такие генераторы, как правило, используют для смены диапазонов частот переключение катушек индуктивности и (для плавного изменения частоты) сдвоенный воздушный конденсатор переменной емкости. Плавная перестройка частоты воз-

можно до 2–3 раз. Поэтому для перекрытия диапазона частот от 100 кГц до 35–50 МГц приходится использовать до 5–10 поддиапазонов частот.

На выходе буферного каскада ГСС высоких частот включается измеритель выходного напряжения, низкоомный переменный резистор (потенциометр) для плавной регулировки сигнала и прецизионный делитель выходного напряжения — аттенюатор. Для осуществления частотной модуляции используется электрически управляемый конденсатор — варикап.

Принятие всех этих мер, или даже их части, ведет к существенному усложнению полных схем ВЧ-генераторов (и тем более СВЧ) стандартных сигналов. Разумеется, для питания электронных узлов таких генераторов приходится использовать стабилизированные источники питания. Разбор конкретных схем измерительных генераторов выходит за рамки данной книги. Тем более в связи с тем, что выпуск измерительных генераторов на основе LC-генераторов в последнее время резко сокращается и они заменяются с генераторами на основе синтезаторов частоты и прямого цифрового синтеза формы сигналов. Они лишены недостатков аналоговых ГСС.

Минимальный уровень выходного сигнала таких генераторов часто составляет доли мкВ. В таких условиях уровень наводок оказывается выше уровня сигнала. Поэтому в конструкции ВЧ ГСС приходится использовать тщательную (порой даже двойную) экранировку, применять литое шасси с вырезами для узлов генератора и т. д. Все это, как и необходимость применения большой шкалы для достаточно точного отсчета частоты и верньера для ее точной установки заметно усложняет конструкцию генераторов и ведет к увеличению их габаритов и веса.

Несмотря на все эти меры и конструктивные решения нестабильность частоты у таких генераторов не удается снизить до уровня примерно 10^{-4} (0,01%). Этого достаточно для испытания обычных радиоприемных устройств диапазонов длинных, средних и коротких волн. Однако для современных магистральных КВ-радиоприемников с узкополосными трактами телеграфной и телетайпной связи нестабильность частоты должна быть на 1–2 порядка ниже, т. е. быть порядка 10^{-6} – 10^{-5} . Для этого приходится применять уже генераторы другого типа — на основе частотного синтеза и прямого цифрового синтеза формы сигналов. Такие генераторы описаны ниже.

Самую высокую стабильность частоты дают кварцевые генераторы с кварцевым резонатором, добротность которого достигает сотен тысяч и даже нескольких миллионов. Для получения особо стабильных частот используются кварцевые генераторы, размещенные в термостате, или даже молекулярные генераторы эталонных частот. Однако, такие генераторы строятся на одну или несколько частот.

Для получения широкого диапазона частот (вплоть до СВЧ) используются описанные далее методы цифрового синтеза частот или генераторы на основе прямого цифрового синтеза сигналов заданной (в том числе синусоидальной) формы. Эти генераторы строятся на основе больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС). Они содержат многие тысячи и даже миллионы транзисторов. Рассмотрение таких устройств возможно только на функциональном уровне, что и сделано в последующих главах данной книги.

1.4. Серийные RC-генераторы низких частот

1.4.1. Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118

RC-генераторы звуковых (от 20 Гц до 20 кГц) и ультразвуковых частот выпускаются многими фирмами. Отечественный генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118 (рис. 1.20) представляет собой источник синусоидального сигнала прецизионной формы волны и предназначен для исследования, настройки и испытаний систем и приборов. Отличительная черта этого генератора, отсутствующая у большинства более простых моделей, — очень низкий коэффициент нелинейных искажений.



Рис. 1.20. НЧ-генератор ГЗ-118

Генератор имеет 5 диапазонов частот от 10 Гц до 200 кГц. Обеспечивает низкий уровень коэффициента гармоник выходного сигнала до $1,5 \times 10^{-3}\%$ в диапазоне частот свыше 200 Гц до 10 кГц (II и III поддиапазоны). Наибольшее значение уровня составляющих с частотой питающей сети и её гармоник на выходе прибора не превышает 0,00075% от установленного значения выходного напряжения. Мощность, потребляемая от сети при номинальном напряжении, не более 30 ВА. Габаритные размеры, мм, не более 312×133×322 мм, масса 7,5 кг.

Прибор оснащается режекторным фильтром для получения особо чистых сигналов. Все это необходимо для проектирования, макетирования и отладки усилителей мощности звуковой частоты класса Hi-Fi и Hi-End.

1.4.2. Генераторы, выпускаемые фирмой МНИПИ

Минский научно-исследовательский и приборостроительный институт (ОАО МНИПИ) разработал и выпускает на рынок несколько моделей низкочастотных генераторов. Все они доступны на нашем рынке.

В основном, генераторы МНИПИ умеренно дешевые RC-генераторы с частотами выходных сигналов до 2 МГц. Так, генератор сигналов низкочастотный ГЗ-131 (рис. 1.21) имеет следующие основные характеристики:

- Диапазон частот 2 Гц — 2 МГц.
- Формы сигналов: синус, импульс ТТЛ.
- 6 поддиапазонов, цифровой индикатор частоты.
- Погрешность установки частоты $\pm 1\%$.
- Нестабильность частоты 0,1% — за 15 мин, 0,5% — за 180 мин.
- Амплитуда ≥ 10 В (без нагрузки); ≥ 5 В (600 Ом).
- Коэффициент гармоник: 0,5% до 20 Гц; 0,2% до 200 кГц; 1% до 2 МГц.
- Плавное и ступенчатое ослабление сигнала.



Рис. 1.21. НЧ-генератор ГЗ-31

Прибор заменяет ряд более старых разработок: ГЗ-102, ГЗ-106, ГЗ-107, ГЗ-109, ГЗ-111, ГЗ-112.

МНИПИ выпускает также генераторы Г4-221 с расширенным диапазоном частот (от 0,1 Гц до 17 МГц). Они обеспечивают генерацию следующих форм сигналов: синусоидальная немодулированная и амплитудно-модулированная; прямоугольная типа "меандр" и импульсы ТТЛ. МНИПИ выпускает также генераторы Г4-221/1 с увеличенной амплитудой выходного сигнала — до 30 В для синусоидального сигнала и "меандра". Однако фирма относит их к категории функциональных генераторов, поэтому они будут описаны в главе 3.

1.4.3. Генератор ГЗ-126

Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-126 представляет собой источник синусоидального и прямоугольного сигналов и предназначен для исследования, настройки и

испытаний систем приборов, используемых в радиоэлектронике, связи, автоматике, вычислительной и измерительной технике, приборостроении. Прибор предельно прост в работе.

Диапазон частот выходного синусоидального сигнала с плавным изменением от 10 Гц до 10 МГц перекрывается 6 поддиапазонами. Основная погрешность установки частоты не выходит за пределы: $\pm 2\%$ в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц (2 .. 5 поддиапазоны); $\pm 3\%$ в диапазоне частот от 10 Гц до 100 Гц (1 поддиапазон) и от 1 до 10 МГц (6 поддиапазон). Нестабильность частоты выходного сигнала за любой 15-минутный интервал времени после двухчасового установления рабочего режима работы прибора в нормальных условиях не выходит за пределы $\pm 4 \times 10^{-4}$. Наибольшее значение уровня выходного напряжения синусоидального сигнала генератора не менее 5 В при сопротивлении нагрузки ($50 \pm 0,25$) Ом и 10 В без нагрузки.

В генераторе сигналов предусмотрен режим внешней синхронизации синусоидальным сигналом. Генератор сигналов обеспечивает дополнительный сигнал прямоугольной формы в диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц. Габаритные размеры 308×130×300 мм, масса 6 кг (с транспортным ящиком — 45 кг!).

1.4.4. Звуковые генераторы GAG 809/810 фирмы GW Instek

К типичным низкочастотным генераторам "бюджетного" класса, часто именуемыми звуковыми генераторами, можно отнести генераторы GAG 809 фирмы GW Instek. Внешний вид прибора показан на рис. 1.22. Прибор имеет предельно простую конструкцию и является типичным аналоговым RC-генератором.

Установка частоты обеспечивается ручкой со шкалой, отградуированной в Гц — от 10 до 100. Справа от нее расположен переключатель диапазонов с кнопками, задающими множитель 1, 10, 100, 1 000 и 10 000. Таким образом, генератор перекрывает диапазон частот от 10 Гц до 1 МГц. Наряду с синусоидальной формой сигнала возможна генерация импульсов прямоугольной формы — меандра. Переключатель формы расположен под переключателем диапазонов. Кроме того, генератор имеет ручку AMPLITUDE плавной регулировки амплитуды, ручку аттенюатора (ослабление от 0 до 50 дБ с шагом 10 дБ), зажимы выхода и выключатель питания.

Коэффициент гармоник генератора GAG 809 имеет следующие значения:

- на частотах 500 Гц ~ 20 кГц: 0,1%;
- на частотах 100 Гц ~ 100 кГц: 0,3%;
- на частотах 50 Гц ~ 200 кГц: 0,3%;
- на частотах 20 Гц ~ 500 кГц: 0,5%;
- на частотах 10 Гц ~ 1 МГц: 1,5%.

Без нагрузки максимальное выходное напряжение генератора не менее 10 В двойной амплитуды. Габариты прибора 130×210×292 мм, масса около 3 кг. Генератор GAG

810 имеет пониженный уровень коэффициента гармоник — менее 0,02% в звуковом диапазоне частот.



Рис. 1.22. Генератор GAG 809 фирмы GW Instek

1.5. Аналоговые ВЧ- и СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов

1.5.1. Основные типы генераторов стандартных сигналов

Для получения синусоидальных сигналов в достаточно широком диапазоне частот с гарантированными параметрами уровня и формы используются *генераторы стандартных сигналов* (ГСС). Советская промышленность выпускала огромную номенклатуру этих приборов, перекрывающих весьма широкий диапазон частот — от инфразвуковых до гигагерцовых. К сожалению, с распадом СССР разработка и промышленное производство этих приборов сильно сократились, многие НИИ и КБ списали эти приборы, а их запасы (к счастью, огромные), попали на склады и продаются по дешевке. Нередко с давно просроченными сроками хранения и эксплуатации и, естественно, отсутствием метрологического обеспечения.

В основном применяются три типа ГСС:

- низкочастотные (звуковые) генераторы на диапазон частот от 10–20 Гц до 20–100 (иногда и выше) кГц (рассмотрены выше);
- генераторы стандартных ВЧ-сигналов (диапазон частот от 100 кГц до 50–150 МГц, иногда и выше);
- генераторы стандартных СВЧ сигналов (диапазон частот от примерно 0,1 до десятков ГГц).

Наряду с ГСС ныне выпускается немало упрощенных генераторов высокочастотных сигналов, которые к генераторам "стандартных сигналов" можно отнести только по недоразумению. Эти приборы имеют плохую экранировку, и в них нередко отсутствуют измерители уровня выходного сигнала. Однако эти простые и дешевые приборы находят применение у радиолюбителей и в школьных, и вузовских лабораториях.

Большое число типов генераторов сигналов вызвано объективными причинами. В частности, сильно отличаются принципы построения и конструкции генераторов различных диапазонов волн. Так, генераторы низких частот обычно строятся как *RC*-генераторы, ВЧ-генераторы на частоты до 100–150 МГц строятся на основе *LC*-генераторов, а СВЧ-генераторы используют объемные резонаторы, отрезки линий передачи и специальные СВЧ-приборы. Лишь в последнее время появились генераторы на основе цифрового синтеза частот и форм сигналов, способные в одном приборе перекрывать диапазон частот от долей герца до десятков гигагерц.

Приведем данные о наиболее распространенных на нашем рынке генераторах ВЧ-сигналов различного типа.

1.5.2. Советские ВЧ-генераторы стандартных сигналов

ГСС ВЧ-диапазона по-своему уникальные приборы. Предназначенные для измерения параметров радиоприемной аппаратуры и исследования высокочувствительных усилительных устройств, они должны обладать высокой степенью экранировки, без чего проведение точных измерений при малых уровнях ВЧ-сигналов просто невозможно. Обязательно наличие измерителя уровня выходного сигнала до аттенюатора и наличие прецизионного аттенюатора с широким (до — (60–80) дБ) диапазоном ослабления сигнала.

Изначально эти приборы строились на основе *LC*-генераторов, как правило, с буферным резонансным каскадом и цепями электронной стабилизации амплитуды выходного сигнала. Первые советские приборы этого класса, например, ГСС-6 и ГЗ-18А, выполненные на электронных лампах, высоко ценились за свою неприхотливость и высокую степень экранировки. Они позволяли работать с уровнями сигналов до 0,1 мкВ, тогда как чувствительность даже профессиональных и военных коротковолновых радиоприемников тех времен была на уровне 2–5 мкВ.

ГСС ГЗ-18А ценится специалистами и радиолюбителями и сейчас, хотя он был разработан более 40 лет назад. Эти приборы по дешевке продаются до сих пор! Диапазон частот приборов от 0,1 до 35 МГц (6 поддиапазонов), уровень выходного напряжения с гарантированной точностью от 0,1 мкВ до 0,1 В. Есть возможность осуществления амплитудной модуляции. Погрешность установки частоты не более 1%. Благодаря применению усилителя ВЧ после автогенератора гарантируется высокая степень чистоты выходного синусоидального напряжения. Габариты прибора 390×280×290 мм, масса 18 кг.

ГЗ-18А были заменены ГСС следующего поколения — на транзисторах. ГСС Г4-118 типичный представитель аналогового поколения этих приборов. Он имеет диапазон частот от 100 кГц до 30 МГц. Габариты прибора 360×190×355 мм, масса 13,5 кг. Прибор имеет большую открытую шкалу частот и простые органы управления. Переключение диапазонов кнопочное, измеритель уровня выполнен на стрелочном индикаторе.

Так, тоже уже устаревший, но пользующийся популярностью ГСС Г4-102 имеет диапазон частот от 0,1 до 50 МГц (8 поддиапазонов). Погрешность установки частоты от 1 до 1,5%, калиброванное выходное напряжение от 0,1 мкВ до 0,5 В. Возможна амплитудная модуляция. Потребляемая мощность: 15 В · А, габаритные размеры 385×190×240 мм, масса 8 кг.

1.5.3. Радиочастотные генераторы HG-1500/1500D фирмы МСР

Фирма МСР известна на российском рынке своими дешевыми измерительными приборами, в частности осциллографами и генераторами. Ныне на нашем рынке представлены две модели простых радиочастотных генераторов: HG1500 с аналоговой шкалой частот и HG1500D с цифровым частотомером для отсчета частоты. Оба генератора являются простыми LC-генераторами, и на роль генераторов стандартных сигналов не претендуют.

Генератор ВЧ-сигналов HG-1500 (рис. 1.23) является комбинированным "бюджетным" прибором типа 3 в 1: ВЧ-генератор, аудиогенератор 1 КГц, генератор стереофонических сигналов диапазона FM.

Основные характеристики этого прибора.

ВЧ-генератор:

- Диапазон рабочих частот от 100 кГц до 150 МГц.
- Внутренняя и внешняя АМ и FM модуляция.
- Вход внешней модуляции: 600 Ом, амплитуда 0 ~ 2,5 В.
- Внутренняя модуляция: синусоида 1 кГц.
- Амплитуда выходного сигнала: 0 ~ 50 мВ эфф.

Генератор синусоидального сигнала 1 кГц:

- Нелинейные искажения: < 1%.
- Амплитуда выходного сигнала от 1 мкВ до 1 В эфф.



Рис. 1.23. Внешний вид радиочастотного генератора HG-1500

Генератор стереосигнала FM диапазона (88 МГц ~ 108 МГц):

- Вход внешней модуляции: 600Ω , амплитуда от 0 до 15 мВ.
- Выходное напряжение на дополнительном мониторинговом выходе: ≤ 50 мВ эфф.

Генератор ВЧ-сигналов HG-1500D по техническим характеристикам аналогичен генератору HG-1500, но содержит встроенный цифровой частотомер. Он измеряет частоту в диапазоне от 10 Гц до 1,3 ГГц, погрешность измерения частоты $\pm 0,005\% \pm 1$ ед. младшего разряда. Внешний вид прибора показан на рис. 1.24.



Рис. 1.24. Внешний вид радиочастотного генератора HG-1500D

1.5.4. Радиочастотный генератор GRG-450B фирмы GW Instek

Хорошо известная массой своих измерительных приборов фирма Good Will уже давно поставляет на российский рынок упрощенный генератор ВЧ-сигналов GRG-450B

(рис. 1.25). Назвать его ГСС трудно, как и описанные выше генераторы фирмы МРС. Хотя прибор имеет изящный внешний вид (не в пример нашему ГУК-1, когда-то выпускаемому в СССР для школьных лабораторий) и довольно широкий диапазон частот (от 0,1 до 150 МГц с "калиброванными" гармониками в диапазоне от 150 до 450 МГц), ему присущ ряд серьезных недостатков: сильно искаженный выходной сигнал (искажения видны на осциллограммах сигнала даже на глаз), большая неравномерность АЧХ, некалиброванный выход, заметная паразитная амплитудная модуляция.



Рис. 1.25. Внешний вид радиочастотного генератора GRG-450B фирмы GW Instek

Погрешность установки частоты прибора 5%, возможна амплитудная модуляция внутренняя (частота 1 кГц) и внешняя (от 50 Гц до 20 кГц). Вскрытие прибора показало, что он выполнен по примитивной схеме LC-генератора без резонансного буферного каскада и вообще без средств подгонки частотной шкалы (не считая возможность изменения L раздвижением витков катушек или их секций).

По всем показателям сигналов эти приборы заметно уступают даже нашему старому советскому ГСС Г4-102. В частности, на некоторых частотах искажения синусоидального сигнала на осциллограммах хорошо видны даже на глаз. И не только там, где генератор дает "калиброванные гармониками"! Но они имеют привлекательный внешний вид, удобную и большую шкалу частот, малые габариты (247×158×140 мм) и малую массу (2,5 кг). Любопытно, что разработчик пожалел применить в этих приборах качественный воздушный конденсатор переменной емкости и использовал дешевый пленочный конденсатор. Хотя размеры корпуса прибора позволяют использовать воздушный конденсатор.

1.5.5. Аналоговые СВЧ-генераторы синусоидальных сигналов

LC-генераторы перекрывают диапазон частот примерно до 300 МГц. Это соответствует лишь нижней границе СВЧ-диапазона частот, к которому относятся частоты выше

30 МГц. На частотах свыше 300 МГц (0,3 ГГц) колебательные контуры конструктивно вырождаются в сосредоточенные цепи и волноводы.

В генераторах наряду с СВЧ-транзисторами (биполярными и полевыми) начинают использоваться различные специальные типы электронных и полупроводниковых приборов, таких, как лампы бегущей волны, клистроны, магнетроны, туннельные и лавинно-пролетные диоды и т. д. Все это приводит к весьма специфическим схемным и конструктивным решениям при построении генераторов синусоидальных сигналов СВЧ-диапазона. Детальное рассмотрение их далеко выходит за рамки данной книги и ниже рассматривается лишь обзорно.

Одной из проблем в построении генераторов СВЧ-диапазона является трудность перестройки резонансных распределенных устройств и волноводных трактов с большой кратностью частот (отношением максимальной частоты генерации к минимальной). Ввиду громоздкости конструкции таких устройств практически невозможно применять их множество в одном генераторе и переключать для получения нужного диапазона частот. Поэтому, начиная примерно с 1 ГГц, приходится использовать множество генераторов, перекрывающих диапазон частот от 1 ГГц до десятков ГГц, широко используемый в радиолокации, спутниковых системах связи, мобильной телефонии, спутниковых системах навигации и т. д. и т. п.

Большинство СВЧ-генераторов обеспечивает следующие режимы работы:

- НГ — немодулированные колебания;
- АМ — амплитудная модуляция от внутреннего или внешнего сигнала;
- ЧМ — частотная модуляция от внутреннего или внешнего сигнала;
- ФМ — фазовая модуляция от внутреннего или внешнего сигнала;
- ИМ — импульсная модуляция от внутреннего или внешнего сигнала.

В СССР выпускалась обширная серия СВЧ-генераторов, доживших до наших дней и реализуемых на нашем рынке некоторыми фирмами. Ниже приведены краткие данные по отдельным таким генераторам.

Г4-176: 0,1–1020 МГц, АМ, ЧМ, ИМ, ТВ модуляции запоминание 11 состояний, управление процессором; масса 24 кг.

Г4-211: 1,07–4,0 ГГц, 80 мВт, НГ, АМ, ЧМ, КОП.

Г4-193: 1–4 ГГц; режимы работы НГ, АМ, ЧМ, ИМ, частотомер, калиброванный выход.

Г4-194: 2–8,3 ГГц; режимы работы НГ, АМ, ЧМ, ИМ.

Г4-1741: 7,44–25,95 ГГц, высокая точность установки частоты 0,01%; масса 30 кг.

Г4-212: 2,0–8,15 ГГц, 60 мВт, НГ, АМ, ЧМ, КОП.

Г4-195: 8,0–18,0 ГГц.

Г4-213: 8,15–17,85 ГГц, 40 мВт, НГ, АМ, ЧМ, КОП.

Из генераторов СВЧ-диапазона частот представляет интерес серия генераторов РГ4-**. Например, генератор РГ4-14 перекрывает диапазон частот от 78,33 до 118,1 ГГц.

Он предназначен для генерирования квазигармонических немодулированных и модулированных сигналов; режим ручной, автоматической и цифровой дистанционной перестройки частоты. Габариты и масса этого прибора вполне умеренные: 304×120×308 мм, масса — 10 кг.

Как видно из приведенных примеров, СВЧ-генераторы советских времен, за редким исключением, были громоздкими и тяжелыми приборами. Сейчас цены на эти приборы довольно высоки, так что к приборам массового применения такие генераторы отнести нельзя. Общей чертой этого поколения генераторов является их узкий диапазон частот и невысокая стабильность частоты.

За время с 1990 г. и до наших дней разработка подобных СВЧ-генераторов у нас и за рубежом практически была прекращена из-за присущих им недостатков. Почти повсеместно такие приборы вытесняются приборами на основе цифрового синтеза высокостабильных частот.

1.6. Основы цифрового синтеза частоты и формы сигналов

1.6.1. Основные методы цифрового синтеза сигналов

Существует довольно много методов синтеза синусоидальных сигналов цифровыми методами. Основными являются следующие методы:

1. Синтез сигналов на основе деления/умножения частоты высокостабильного (опорного) генератора с очисткой сигнала путем фильтрации.
2. Прямой цифровой синтез сигналов DDS (Direct Digital Synthesizers) путем опроса памяти, хранящей оцифрованные отсчеты сигнала заданной формы, с преобразованием их в аналоговый сигнал с помощью высокоскоростных цифроаналоговых преобразователей.

Первый способ в настоящее время реализован с помощью целого ряда микросхем синтезаторов частоты. При этом используются как цифровые, так и аналоговые делители и умножители частоты. Как правило, получить достаточно чистый синтезированный сигнал очень трудно. Поэтому широко используются системы фазовой автоподстройки (ФАПЧ) генератора синусоидальных сигналов под синтезированный сигнал, его гармоники или субгармоники. Структурно такие генераторы очень сложны и вряд ли их стоит рассматривать в книге, посвященной не конструированию, а применению генераторов сигналов.

1.6.2. Генераторы на основе цифрового синтезатора частот

Достоинством обычных генераторов синусоидальных сигналов является возможность получения синусоидальной формы выходного сигнала с малыми нелинейными иска-

жениям. А главным недостатком — низкая стабильность частоты. Исключением являются кварцевые генераторы, но они обычно генерируют сигналы только одной частоты — основной или ее гармоники.

Для генерации синусоидальных сигналов с высокой стабильностью частоты используются генераторы на основе цифрового синтезатора частот. Типичная функциональная схема такого генератора показана на рис. 1.26. Основу генератора составляют два генератора. Первый генератор — это высокостабильный опорный генератор эталонной частоты $f_{эт}$ и делитель частоты с фиксированным коэффициентом деления M . Он формирует разрешение по частоте $f_1 = f_{эт}/M$.

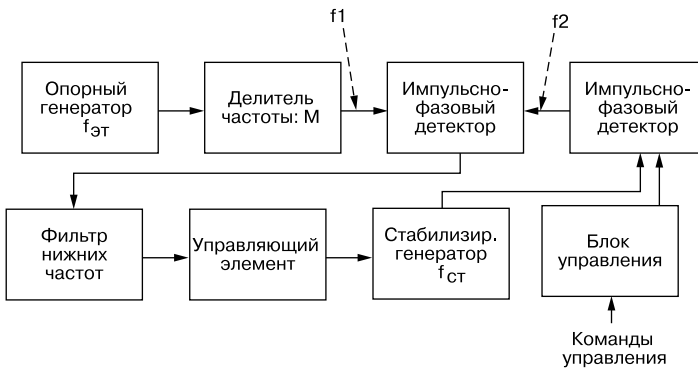


Рис. 1.26. Функциональная схема генератора синусоидального сигнала на основе цифрового синтезатора частоты

Второй генератор — это стабилизированный генератор, перестраиваемый в достаточно широких пределах цепью фазовой автоподстройки частоты. Его сигнал делится в N раз с помощью делителя с переменным коэффициентом деления ДПКД. Для перестройки делителя используется блок управления. Сигнал с частотой $f_1 = f_{ст}/N$ сравнивается с сигналом с частотой $f_2 = f_{эт}/M$ с помощью импульсного фазового детектора. Его выходной сигнал фильтруется фильтром низких частот и подается на регулирующий элемент, меняющий частоту стабилизированного генератора до тех пор, пока не будет обеспечено условие $f_1 = f_2$, что соответствует установившейся частоте стабилизированного генератора

$$f_{ст} = f_{эт} \cdot N/M.$$

Например, если нужно получить частоты от 1 до 2 МГц с шагом в 1 Гц, надо при $f_{эт} = 1$ МГц иметь $M = 1 \cdot 10^6$ и N от $1 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^6$.

Стабилизированный генератор с управляющим элементом может строиться по любой известной схеме, например, LC-генератора с перестройкой частоты варикапом или электромагнитом. Если нужна перестройка по частоте в широких пределах (например, почти с 0), то можно использовать пару генераторов со смесителем, т. е. генератор на биениях.

Поскольку в генераторах этого типа не используется квантование по амплитуде сигнала, последний является непрерывным и может иметь весьма близкую к синусоидальному

форму. Генераторы с функциональной схемой (рис. 1.26) и разными ее вариантами выпускаются в виде специализированных интегральных микросхем частотных синтезаторов.

1.6.3. Генераторы произвольных функций (AFG)

Генераторы второго класса — это приборы серии AFG, использующие технологию прямого цифрового синтеза сигналов (Direct Digital Synthesis или DDS), имеют функциональную схему, упрощенно представленную на рис. 1.27 [112]. Корпорация Tektronix называет такие генераторы как AFG (Arbitrary Function Generator — Генератор Произвольных Функций). Генерация сигналов в этом новейшем поколении цифровых генераторов основана на использовании заранее подготовленных и хранящихся в памяти оцифрованных N выборок сигнала за его один период. Типичное число выборок составляет от нескольких сотен до многих тысяч. Каждая выборка представляет значение сигнала в виде числа с некоторой разрядностью, которая имеет значения от 8 до 14 бит и определяет разрядность кодирования сигналов по амплитуде.

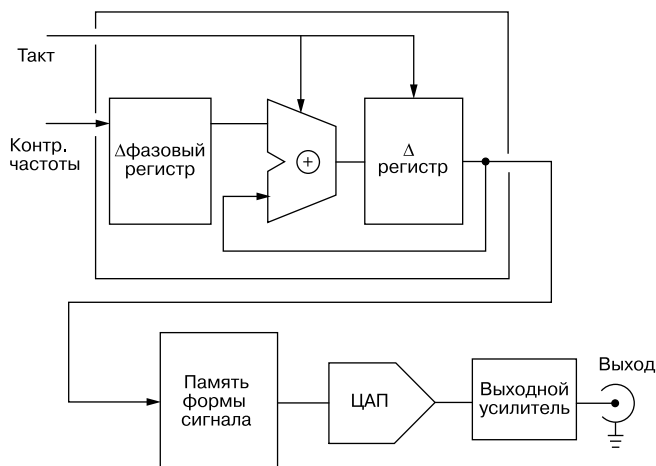


Рис. 1.27. Функциональная схема генератора AFG (Arbitrary Function Generator — Генератор Произвольных Функций), использующего прямой цифровой синтез сигналов

Генерация сигнала с точно заданной частотой основана на выработке адреса отсчетов сигнала на основе фиксации дискретного фазового сдвига с помощью Δ -фазового регистра и уровня сигнала с помощью Δ -регистра. Как только набегает фазовый сдвиг 360° , выработка адреса прекращается (в режиме единичного запуска) или возобновляется заново (в непрерывном режиме или в режиме генерации пачки сигналов). Блок памяти форм хранит шаблоны цифровых сигналов различной формы (в том числе произвольной, заданной пользователем). В этой главе мы пока рассматриваем реализацию генерации только синусоидального сигнала. Цифроаналоговый преобразова-

тель (ЦАП) соответствующей разрядности и быстродействия преобразует цифровые сигналы в аналоговые, которые усиливаются выходным усилителем.

1.6.4. Генераторы сигналов произвольной формы (AWG)

Генераторы класса AWG (Arbitrary Waveform Generator — генераторы сигналов произвольной формы) основаны на более простом, но тоже вполне современном, способе задания адресов (рис. 1.28), что обеспечивает получение сигналов типовых форм, но несколько меньшие возможности управления ими. Корпорация Tektronix ранее выпускала серии таких генераторов AWG400/500/700. В настоящее время они заменяются более новыми и уже выпускаемыми генераторами серий AWG5000/7000. О выпуске генераторов серии AWG7000 объявлено в марте 2007 г.

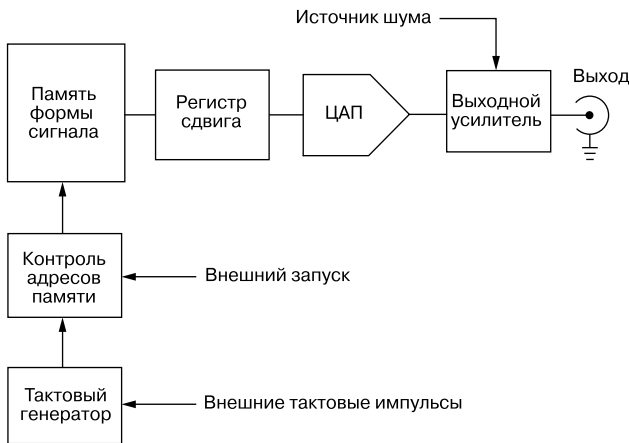


Рис. 1.28. Упрощенная функциональная схема генераторов класса AWG

Высокие (до 20 Гвыб/с) скорости выборки у этих приборов достигнуты за счет применения специальной технологии сверхбыстрых переключающих гетеропереходных приборов на германии и арсениде галлия. Разумеется, это удорожает эти уникальные приборы. Подробное описание их дано в главе 4.

1.6.5. Шум квантования у генераторов с цифровым синтезом формы сигналов

Переход к цифровым методам синтеза сигналов ведет к некоторым специфическим особенностям синтезированных сигналов. Рис. 1.29 поясняет суть синтеза сигналов. Выборка отсчетов сигналов из памяти производится через равные промежутки времени. Отчеты сигналов можно представить в виде вертикальных отрезков с точкой над ними, характеризующими дискретные отсчеты сигнала с ограниченной разрядностью (она, однако, редко бывает меньше 8 бит, что соответствует $2^8=256$ возможным уровням сигнала).



Рис. 1.29. Синтезированный сигнал в идеале (а), его дискретные отсчеты, взятые из памяти (б), и их интерполяция (пунктирная кривая)

После преобразования каждого оцифрованного отсчета в аналоговый отсчет с помощью ЦАП получается последовательность аналоговых отсчетов — импульсов с амплитудой, равной амплитуде аналогового сигнала. Есть два пути превращения этих импульсов в аналоговый сигнал:

1. Применение фильтра, близкого к фильтру по базису теоремы об отсчетах (Котельникова).
2. Запоминание амплитуды отсчета до появления следующего отсчета, т. е. представление сигнала ступенчатой кривой, близкой к кривой, представляющей сигнал.

Первый способ широко используется в цифровых осциллографах и иногда в генераторах синусоидальных сигналов с малыми нелинейными искажениями сигнала. Недостаток этого способа связан с трудностями его реализации для генераторов высокочастотных сигналов, работающих в широком диапазоне частот. Второй способ намного проще и может быть реализован в широком диапазоне частот. Как видно из рис. 1.30, где дан пример квантования синусоиды, при нем вместо чистой синусоиды строится близкий к ней ступенчатый сигнал, который по существу является типичным квантованным сигналом.

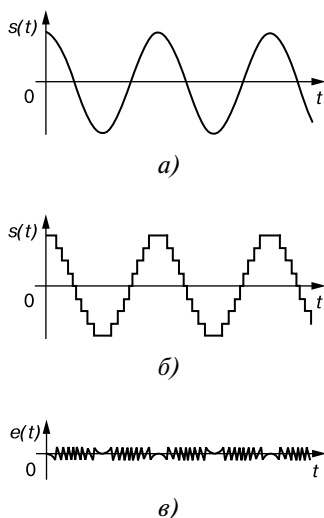


Рис. 1.30. Идеальный синусоидальный сигнал (а), реальный сигнал на выходе ЦАП с запоминанием (б) и шум квантования (в)

Разность между идеализированным сигналом на выходе генератора (рис. 1.30, *a*) и реальным сигналом (рис. 1.30, *б*), показанная на рис. 1.30, *б*, называется *шумом квантования* и определяется как:

$$e(t) = s(t) - s_k(t). \quad (1.24)$$

Из рис. 1.30 очевидно, что амплитуда шумового сигнала составляет не более половины амплитуды ступеньки Δ . В общем случае положение ступенек от цикла к циклу сигнала имеет случайный характер, а потому $e(t)$ воспринимается как шум.

Если считать, что $e(t)$ описывается случайным законом с равномерным распределением в пределах от $-\Delta/2$ до $\Delta/2$, то среднее значение сигнала шума будет нулевым, а дисперсия равна $\Delta^2/12$. Это позволяет оценить важный шумовой параметр генераторов с цифровым синтезом сигнала — *отношение сигнал/шум* (signal-to-noise ratio):

$$SNR = \frac{A}{\sqrt{\Delta^2/12}} = \frac{2A\sqrt{3}}{\Delta} = N\sqrt{3}, \quad (1.25)$$

где $N=2A/\Delta$ — число ступенек квантования, которые укладываются на двойной размах синтезируемого сигнала.

Если ЦАП имеет p двоичных разрядов, обеспечивающих $N=2^p$ уровней квантования, то параметр SNR можно записать в виде:

$$SNR = 2^p \sqrt{3}. \quad (1.26)$$

Отношение сигнал/шум можно выразить также в децибелах:

$$SNR_{дБ} = 20 \log(2^p \sqrt{3}) = 20p \log(2) + 10 \log(3) = 6p + 4,77 \text{ дБ}. \quad (1.27)$$

Например, при 8-разрядном кодировании $SNR_{дБ}=52,77$ дБ, а при 14-разрядном — 88,77 дБ. Такой шум является умеренным, но никак не малым, и это является существенным недостатком генераторов, работающих на основе цифрового синтеза сигналов.

Практически ступени квантования синусоидального сигнала от реальных генераторов можно наблюдать с помощью хорошего осциллографа — желательно аналогового, так как цифровой осциллограф сам отображает квантованным даже идеальный сигнал. Некоторые математические операции, например дифференцирование, могут приводить к резкому возрастанию шума квантования и его деталей, таких как перепады напряжения при смене уровня ступенек.

Из рис. 1.30, видно, что шум создается сигналом, средняя частота которого равна частоте квантования $f_k=1/\Delta$, где — шаг квантования, который в N раз меньше периода синусоидального сигнала на выходе генератора. Это позволяет существенно уменьшить шум квантования, вырезав режекторным фильтром область спектра сигнала в районе частоты f_k . Отдаленность частоты квантования от частоты сигнала упрощает решение этой задачи и позволяет применять простые фильтры.

1.7. Генераторы синусоидальных сигналов с цифровым синтезом умеренной сложности

1.7.1. Отечественные генераторы с цифровым синтезом

Еще в СССР был разработан ряд генераторов синусоидального напряжения с цифровым синтезом сигнала. Некоторые модели таких генераторов дожили до наших дней. Так, генератор высокочастотный Г4-154 имеет широкий диапазон частот от 100 Гц до 50 МГц с цифровой установкой и индикацией частот и возможностью амплитудной модуляции. Размеры приборы 356×133×370 мм, масса 10,5 кг.

Из числа вполне современных и не слишком дорогих отечественных ГСС нового поколения стоит отметить прибор Г4-158А (рис. 1.31), который перекрывает диапазон частот от 0,1 до 130 МГц. Установка частоты дискретная с цифровым контролем. Предусмотрена амплитудная и частотная модуляции (с девиацией до 400 кГц). У прибора Г4-158 диапазон частот немного уже (до 100 МГц), и предусмотрена возможность только амплитудной модуляции.



Рис. 1.31. Современный ВЧ ГСС Г4-158А

У более новых приборов Г4-164/164А диапазон частот расширен до 640 МГц, но это куда более дорогие и тяжелые приборы (масса 22 кг против 10 у Г4-158/158А).

Генератор Г4-219 — настольный цифровой прибор общего назначения. Его внешний вид показан на рис. 1.32. Прибор предназначен для использования в качестве источника сигнала при регулировании, ремонте и поверке радиоэлектронной аппаратуры различного назначения, а также для использования в качестве встраиваемых гетеродинов в сложных автоматизированных радиоизмерительных системах. Работа генератора Г4-219 основана на принципе прямого цифрового синтеза частоты. Генерируемый сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны.



Рис. 1.32. Внешний вид генератора Г4-219

Генератор Г4-219 имеет все указанные ранее пять режимов работы: НГ, АМ, ЧМ, ФМ и ИМ. Предусмотрено управление генератором через встроенный интерфейс RS-232. Основные данные прибора:

- Рабочий диапазон несущей частоты от 1 Гц до 100 МГц.
- Шаг установки несущей частоты от 0,001 до 10 Гц.
- Основная погрешность установки несущей частоты не более $5 \cdot 10^{-6}$.
- Максимальный уровень выходного сигнала на нагрузке 50 Ом не менее 20 мВт.
- Глубина регулировки выходного сигнала 100 дБ.
- Основная погрешность регулировки выходного уровня не более 1 дБ при регулировке 60 дБ и не более 2,5 дБ при регулировке до 100 дБ.
- Рабочий диапазон модулирующей частоты от 0,1 Гц до 100 кГц от внутреннего генератора с шагом перестройки от 0,1 до 10 Гц.
- Два вида внутреннего генератора модулирующего напряжения в режиме АМ и ФМ: синусоидальный и прямоугольный.
- Четыре вида внутреннего генератора модулирующего напряжения в режиме ЧМ: синусоидальный, прямоугольный, треугольный и линейно-импульсный.

Эти приборы идеально подходят для снятия интермодуляционных характеристик и характеристик чувствительности радиоприемников и радиоизмерительных приборов. Имеют ряд специальных тестов, упрощающих процедуру измерения. Имеют ряд опций (дополнительных средств): модулятор GSM, модулятор Bluetooth и GSM и высокоскоростной импульсный модулятор. Габариты Г4-219 невелики (290×130×210 мм), масса около 5 кг.

Приведем краткие сведения о еще нескольких отечественных генераторах, использующих различные цифровые методы синтеза сигналов в широкой полосе частот.

Г4-220: 1 МГц–2400 МГц; модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, ИМ; габариты 474×131×260 мм; масса 8 кг.

РГ4-02: 10 КГц–0,05 ГГц, импульсная модуляция, самодиагностика; масса 25 кг.

РГ4-03 3 776 0,05–1,1 ГГц, импульсная модуляция, самодиагностика; масса 30 кг.

РГ4-05: 2–3,2 ГГц, импульсная модуляция, самодиагностика; масса 25 кг.

Генераторы с цифровым синтезом сигналов даже внешне резко отличаются от рассмотренных ранее аналоговых генераторов *RC*- или *LC*-типа. У них нет привычных ручек точной и грубой установки частоты, нет привычных шкал и лимбов. Вместо этого они управляются кнопками, в том числе для установки значения частоты в цифровой форме. Иногда, например, при необходимости плавного изменения частоты, это неудобно. Поэтому используется автоматическое дискретное изменение частоты в сторону увеличения или уменьшения с малым шагом изменения. Это позволяет имитировать плавное изменение частоты. Иногда для этого используется поворотная ручка, которая позволяет (изменением дискретного шага изменения частоты) менять скорость изменения частоты.

Некоторые приборы выделяются необычно широким диапазоном частот генерируемых сигналов — от инфранизкочастотных до ВЧ и СВЧ. Наиболее современные генераторы, реализующие прямой цифровой синтез сигналов, могут генерировать множество (до 16 и более) форм сигналов, зашитых в их память, и сигналов произвольной формы. Такие приборы описаны в главе 4. Напомним, что в этой главе описание ограничено более простыми генераторами синусоидальных сигналов.

1.7.2. Генератор SG-1501B фирмы JungJin

Фирма JungJin поставляет на наш рынок генератор АМ / ЧМ / стерео ЧМ-сигналов SG-1501B. Внешний вид прибора показан на рис. 1.33. Отличительная черта прибора — поддержка стереофонической ЧМ.



Рис. 1.33. Генератор АМ / ЧМ / стерео ЧМ-сигналов SG-1501B

Основные технические характеристики генератора SG-1501B:

- Частотный диапазон от 100 КГц до 50 МГц.
- Дискретность установки частоты 100 Гц.
- Выходной уровень сигнала от -20 дБмкВ до 126 дБмкВ.

- Погрешность установки частоты $\pm 5 \cdot 10^{-6}$.
- Уровень паразитных и гармонических составляющих ≤ -30 дБн.
- ЧМ стереофоническая модуляция.
- Запись/считывание до 100 профилей настройки прибора.
- Подсветка клавиш управления.
- Четыре цифровых дисплея (частота/уровень/глубина АМ/девиация ЧМ).
- По отдельному заказу: пульт дистанционного управления, интерфейс GPIB.

Это стационарный прибор, предназначенный для исследования, разработки и отладки радиоприемных устройств бытового и специального назначения. Он является полноценной заменой предшествующего поколения ГСС для настройки радиотехнических устройств в диапазонах длинных, средних и коротких волн. При этом преимущества прибора в стабильности частоты и точности ее установки очевидны, как и наличие стереофонической частотной модуляции.

1.7.3. Генератор VC2003 фирмы VICTOR

Фирма VICTOR поставляет на наш рынок генератор сигналов VC2003 (рис. 1.34). Прибор реализует формирование сигнала методом прямого синтеза (DDS) и рассчитан на генерацию сигналов от сверхнизких частот (начиная с 1 Гц) до ультразвуковых частот и частично радиочастот.



Рис. 1.34. Генератор сигналов VC2003

Основные технические характеристики генератора VC2003 следующие:

- Разрешение по вертикали 10 бит.

- Диапазон частот от 1 Гц до 3 МГц.
- Разрешение: 0,01 Гц, точность установки $5 \cdot 10^{-5}$.
- Нестабильность частоты: не более $5 \cdot 10^{-5}$ ($-40^\circ \text{C} \dots +85^\circ \text{C}$).
- Форма выходного сигнала: синус, меандр, TTL.
- Длительность фронта TTL импульса менее 20 нс.
- Коэффициент нелинейных искажений для синуса: от 1 Гц до 1 МГц -40 дБ, от 1 МГц до 3 МГц -30 дБ.
- Уровень выходного сигнала от 5 мВ до 8 В (на нагрузке 50 Ом).
- Нестабильность амплитуды не более $\pm 5\%$.
- Глубина амплитудной модуляции (внутренняя 400 Гц, 1000 Гц) от 1 до 100%.
- Внешний модулирующий импульс с частотой от 100 Гц до 100 кГц.
- Режим свипирования частоты линейный, логарифмический.
- Скорость свипирования от 0,02 до 5 с/шаг.
- Одновременная индикация частоты и уровня выходного сигнала.

Это сравнительно дешевый и простой прибор. Главный его недостаток — низкое значение максимальной генерируемой частоты — всего 3 МГц. Так что для отладки ВЧ-аппаратуры он не слишком пригоден.

1.7.4. Генераторы высокочастотные АКТАКОМ АНР-2015/ 2150

АКТАКОМ поставляет на российский рынок две модели высокочастотных генераторов с цифровым синтезатором частоты. Ниже представлены их характеристики.

АНР-2015

Высокочастотный генератор АМ/ЧМ-сигналов специальной формы: частотный диапазон 100 кГц...300 МГц, выходной уровень — 121 дБм...+7 дБм на нагрузку 50 Ом, АМ, ЧМ, ЧМ-стерео, запись/считывание до 100 профилей, RS-232, GPIB (опция), питание 220 В, габаритные размеры 115×430×310 мм, масса 4,5 кг.

АНР-2150

Высокочастотный генератор АМ/ЧМ-сигналов специальной формы: частотный диапазон 100 кГц...150 МГц, выходной уровень — 133 дБм...+13 дБм на нагрузку 50 Ом, АМ, ЧМ, ЧМ-стерео, запись/считывание до 100 профилей, RS-232, GPIB (опция), питание 220 В, габаритные размеры 115×430×310 мм, масса 4,5 кг.

Обе модели полноценно и с большим запасом по частоте заменяют первое поколение ГСС и могут использоваться для тестирования и отладки аппаратуры, работающей как в диапазонах длинных, средних и коротких волн, так и в диапазоне УКВ — в частности приемников УКВ ЧМ вещания и телевизионных приемников.

1.7.5. Генераторы высокочастотные АКИП ГСВЧ-3000

Фирма "Прист" под торговой маркой АКИП также поставляет на наш рынок генераторы различных сигналов. Так, генератор АКИП ГСВЧ-3000 — типичный генератор с цифровым синтезом частоты синусоидального сигнала.

Краткие характеристики модели:

- Частотный диапазон 10 ... 3000 МГц.
- Прямой цифровой синтез сигналов.
- Высокое разрешение выходной частоты (1 Гц).
- Низкий уровень фазовых шумов.
- Девиация частоты до 100 кГц с разрешением 0,1 кГц.
- Широкий диапазон установки выходного уровня (-120 ... 0 дБм).
- Защита выхода от внешнего источника (25 Вт максимально).
- Запись в память до 20 профилей.

Этот генератор рассчитан на применение в качестве источника сигналов начиная с радиочастотного диапазона до СВЧ диапазона.

1.8. Генераторы с цифровым синтезом фирмы Agilent Technologies

В мире есть "три кита" (фирмы Tektronix, Agilent Technologies и ROHDE&SCHWARZ), лидирующих в разработке серьезных (увы, и дорогих) генераторов с цифровым синтезом. Мы начнем рассматривать их продукцию начиная с приборов фирмы Agilent Technologies, выросшей из недр знаменитой Hewlett Packard, десятилетиями выпускавшей высококачественные радиоизмерительные приборы, в том числе генераторы синусоидальных сигналов. Затем рассмотрим приборы ROHDE&SCHWARZ. Фирма Tektronix сосредоточила свои усилия на разработке наиболее универсальных приборов — генераторов сигналов произвольной формы. Все они, разумеется, генерируют и ряд сигналов стандартных форм (в том числе синусоидальные). Этим приборам посвящена отдельная глава 3.

1.8.1. Генератор аналоговых сигналов E4428C

Серия так называемых "аналоговых сигнал-генераторов" (Analog Signal Generator) ESG представлена базовой моделью E4428C ESG. Внешний вид прибора со стороны передней панели представлен на рис. 1.35. Это типичный настольный стационарный прибор, пригодный для монтажа в стойку.

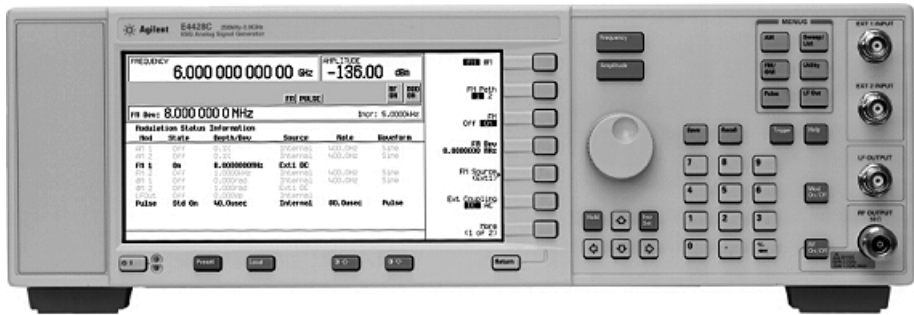


Рис. 1.35. Внешний вид спереди генератора E4428C ESG

Вид на прибор сзади показан на рис. 1.36. В нижней части задней панели прибора видны стандартные средства для подключения дополнительных приборов, разъем локальной сети, разъем порта RS-232 и др. Ряд разъемов сверху появляется при установке в прибор дополнительных опций, расширяющих его возможности.



Рис. 1.36. Внешний вид генератора E4428C ESG сзади

Прибор имеет следующие технические характеристики:

- Диапазон частот синусоидального сигнала от 250 кГц до 3 или 6 ГГц.
- Разрешение по частоте 0,01 Гц.
- Уровень сигнала от -136 до 17 дБм до частот в 1 ГГц, до 16 дБм на частотах до 3 GHz и 10 дБм на частотах до 6 ГГц.
- Точность установки уровня от +/-0,5 до +/-0,9 дБ (при уровне > -110 дБм).
- Фазовый шум -134 дБс/Гц SSB при сдвиге 20 кГц от частоты в 1 ГГц.
- Основные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная.
- Интерфейсы: 10BaseT LAN, GPIB, SCPI и IIVI-COM drivers.

Генератор рассчитан на генерацию сигналов если и не в предельно широком, то достаточно широком диапазоне частот — от диапазона частот средних волн до СВЧ диапазона частот.

1.8.2. Генератор аналоговых сигналов N5181C MSG

Генератор N5181A MXG служит для генерации радиочастот от 250 кГц до 1, 3 или 6 ГГц. Внешний вид прибора спереди показан на рис. 1.37.



Рис. 1.37. Внешний вид генератора N5181A MXG спереди

Основные характеристики прибора:

- Частотный диапазон от 250 кГц до 1, 3 или 6 ГГц (возможно расширение вниз до 100 кГц).
- Уровень мощности выходного сигнала до +13 дБм на частоте 1 ГГц.
- Уровень фазового шума ≤ -121 дБс/Гц на частоте 1 ГГц и расстройке на 20 кГц.
- Время электронного переключения частоты менее 1,2 мс в режиме SCPI.
- Время переключения в режиме list менее 900 мкс для частоты и амплитуды.
- Основные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная.
- Интерфейсы: 10BaseT LAN, GPIB, USB-2, SCPI и IVI-COM drivers.

1.8.3. Генератор аналоговых сигналов E8663B

Новый радиочастотный генератор E8663B отличается широким частотным диапазоном, исключительно высоким разрешением по частоте (0,001 Гц) и малым уровнем фазового шума. Внешний вид генератора вполне традиционный для генераторов фирмы Agilent Technologies. Он показан на рис. 1.38 со стороны передней панели.

Основные характеристики генератора:

- Частотный диапазон от 100 кГц до 3,2 или 9 ГГц.
- Разрешение по частоте 0,001 Гц.
- Мощность сигнала на выходе от -135 до +22 дБм с разрешением 0,01 дБм.
- Время установления частоты 7 мс, амплитуды 3 мс.
- Одновременная модуляция следующих видов: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная от двух внутренних или внешних источников.



Рис. 1.38. Внешний вид генератора E8663B

- Внутренние источники обеспечивают сигналы: синусоидальный, прямоугольный, треугольный, пилообразный, спип-синусоиды, двойную синусоиду и шум с равномерным и Гауссовским распределениями.
- Качание частоты и уровня сигнала во всех их диапазонах изменения.
- Встроенный двойной функциональный генератор со следующими формами сигнала: синусоидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная и шумовая.
- Энергонезависимая память 14 Мбайт для сохранения настроек генератора (до 1000 настроек).
- Интерфейсы: 10BaseT LAN, GPIB, USB-2, SCPI и IVI-COM.
- Габариты 426×178×515 мм, масса 22 кг.

Широкий диапазон частот, от длинных волн для СВЧ, высокое разрешение и обширные функциональные возможности делают этот прибор уникальным инструментом для тестирования, отладки и исследования огромного числа различных радиотехнических устройств. Однако надо помнить, что это стационарный прибор значительных габаритов и массы.

1.8.4. Генератор N9310A RF

Профессиональный радиочастотный генератор N9310A RF является прибором для профессионального применения. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.39. Интуитивно понятный и типичный для таких приборов интерфейс пользователя и удобное кнопочное управление делает работу с прибором простой и наглядной.

Основные параметры генератора N9310A RF:

- Частотный диапазон по основному каналу CW от 9 кГц до 3 ГГц.



Рис. 1.39. Внешний вид генератора N9310A RF

- Частотное разрешение 0,1 Гц.
- Нестабильность частоты менее $1 \cdot 10^{-6}$ за год.
- Частотный диапазон по дополнительному каналу LF от 20 Гц до 80 кГц.
- Мощность выходного сигнала от -127 до +13 дБм (возможна установка максимальной мощности до +20 дБм).
- Разрешение по уровню 0,1 дБ, погрешность установки уровня ± 1 дБ на частотах выше 100 кГц.
- Уровень фазового шума -95 дБс/Гц на частоте 1 ГГц при расстройке 20 кГц.
- Аналоговая модуляция: АМ (0–100% в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц), ЧМ (девиация от 20 Гц до 100 кГц, частота модулирующего сигнала от 20 Гц до 80 кГц), ФМ и импульсная.
- Опционально установка IQ модулятора с полосой частот до 40 МГц.
- Поддержка графического интерфейса пользователя на 11 языках.
- Подключение к компьютеру через стандартный порт USB.
- Управление прибором через порт SCPI.
- Габариты прибора 132×320×400 мм, масса 9,2 кг.

Хотя прибор отличается высокими техническими характеристиками, он имеет умеренную стоимость (по меркам западного покупателя). Области применения такого прибора весьма обширны и могут дополнительно расширяться с помощью различных опций. Нельзя не отметить такие достоинства прибора, как умеренные габариты и масса.

1.8.5. Генератор E8257D PSG с частотой до 67 ГГц

Генераторы E8257D PSG — самые высокочастотные (частота сигналов у них доходит до 67 ГГц (не нормировано до 70 ГГц)). С дополнительными внешними модулями генераторы обеспечивают генерацию сигналов вплоть до 325 ГГц, т. е. их сигналы заходят в область миллиметровых волн! При этом обеспечена генерация сигналов от 250 кГц. При этом обеспечено очень высокое разрешение по частоте — до 0,001 Гц. Внешний вид генераторов показан на рис. 1.40.



Рис. 1.40. Внешний вид генераторов серии E8257D PSG

Технические характеристики генераторов серии E8257D PSG:

- Частотный диапазон от 250 кГц до 20, 31,8, 40, 50 или 67 ГГц (максимальные частоты до 70 ГГц).
- Разрешение по частоте 0,001 Гц.
- Максимальные частоты с внешними модулями 75, 90, 110, 140, 170, 220 или 325 ГГц.
- Максимальная мощность сигнала на выходе +23 дБм на частотах до 20 ГГц, +17 дБм на частотах до 40 ГГц и +14 дБм на частотах до 67 ГГц.
- Генерация импульсов со временем нарастания 8 нс и длительностью 20 нс.
- Сдвоенный встроенный функциональный генератор, генерирующий сигналы следующих форм: синусоидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная и шум.
- Различные режимы переключения частоты и мощности.
- Контроль источников с применением серии PSA анализаторов спектра.
- Интерфейсы: 10BaseT LAN, GPIB, SCPI и IVI-COM.

Генераторы E8257D PSG — приборы, безусловно, уникальные. Ими может гордиться далеко не каждая исследовательская лаборатория, работающая в области исследования миллиметровых радиоволн и их применения.

1.9. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы ROLDE&SCHWARE

Вполне достойным соперником фирмы Agilent Technologies на рынке высококачественных генераторов синусоидальных сигналов является германская фирма ROLDE&SCHWARE. Ее генераторы отличаются рекордно малыми временами установления заданной амплитуды и частоты сигналов и высочайшей степенью чистоты синусоидальных сигналов.

1.9.1. Портативный переносный генератор R&S SM300

Генератор R&S SM300 — это самый современный портативный прибор сравнительно умеренной стоимости. Внешний вид генератора показан на рис. 1.41. Явно видно, что это переносной прибор, предназначенный для работы не только в стационарных условиях, но и на выезде. Для этого спереди и сзади, а также на ручке для переноски имеются обширные обрезиненные области, предохраняющие прибор от последствий ударов.



Рис. 1.41. Внешний вид портативного переносного генератора R&S SM300

Весьма впечатляют технические характеристики этого, безусловно, уникального прибора. Они практически аналогичны характеристикам генератора N9310A RF фирмы Agilent Technologies. Диапазон частот сигналов основного выхода от 9 кГц до 3 ГГц с разрешением (шагом) 0,1 Гц. По дополнительному выходу генератор обеспечивает сигналы в диапазоне частот от 20 Гц до 80 кГц. Время установления заданной частоты менее 10 мс.

Управление уровнем сигнала возможно в диапазоне частот от 20 Гц до 3 ГГц с шагом 0,1 дБ и диапазоном изменения уровня от -127 дБм до 13 дБм, погрешность установки уровня менее 1 дБм. Возможны режимы непрерывной генерации, АМ, ЧМ, ФМ и импульсной модуляции IQ. Модуляция возможна как от внешнего источника, так и от второго встроенного генератора.

Прибор имеет два разъема USB для подключения к компьютеру, цветной жидкокристаллический дисплей с разрешением 320×240 пикселей, размером по диагонали 5,4 дюйма. Габариты прибора 219×147×350 мм, масса 7 кг.

1.9.2. Стационарные генераторы R&S серии SML/SMV

Серия стационарных генераторов фирмы R&S SML имеет типичное стоечное оформление (рис. 1.42). Приборы имеют все необходимое для приборов общего назначения: широкий диапазон частот, высокую стабильность частоты, простой и удобный интерфейс, все средства для эффективной работы с компьютером в составе современных измерительных систем.



Рис. 1.42. Внешний вид генератора серии SML0*

В серию входит три прибора, которые отличаются только частотным диапазоном генерируемого синусоидального сигнала:

- SML01 9 кГц — 1,1 ГГц
- SML02 9 кГц — 2,2 ГГц
- SML03 9 кГц — 3,3 ГГц

Остальные характеристики одинаковы для всех приборов этой серии:

- Мощность выходного сигнала от -140 дБм до +13 дБм (не гарантировано до +19 дБм).

- Точность установки уровня $-0,5$ дБ.
- Настройка уровня без превышения предела.
- Фазовый шум SSB менее -128 дБн на частоте 1 ГГц при отстройке 20 кГц.
- Время установления частоты и уровня не более 10 мс.
- Основные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная (с встроенным импульсным модулятором).
- Совместная АМ, ЧМ, ФМ и импульсная векторная модуляция.
- Габаритные размеры $427 \times 88 \times 450$ мм, масса менее 8 кг.

На основе генераторов серии SML выпускаются векторные генераторы сигналов серии SMV 03 (рис. 1.43). Они оснащены дополнительным широкополосным I/Q модулятором, способным с внешним источником I/Q сигналов генерировать любые сигналы с кодоимпульсной модуляцией, которые находят широкое применение в современных цифровых системах связи.



Рис.1.43. Внешний вид векторного генератора сигналов SMV 03 фирмы R&S

Более подробная информация о возможностях векторных генераторов сигналов дана ниже (см. разделы 1.9.5 и 1.9.6).

1.9.3. Стационарные генераторы R&S SMA/SMB/SMF100A

Генератор SMA100A — это прибор, удовлетворяющий всем высоким требованиям к генераторам, предназначенным как для применения в серьезных лабораторных исследованиях, так и для применения в промышленности в составе автоматизированных и компьютеризированных измерительных систем и комплексов. По внешнему оформлению (рис. 1.44) — это типичный настольный прибор, который может монтироваться в обычные стойки.

Основные параметры генератора SMA100A:

- Частота выходного сигнала от 9 кГц до 3 или 6 ГГц.
- Мощность выходного сигнала от -145 дБм до $+18$ дБм (не гарантировано до $+28$ дБм!).
- Точность установки уровня $-0,5$ дБ.



Рис. 1.44. Внешний вид генератора сигналов SMA100A фирмы R&S

- Фазовый шум SSB менее -131 дБн при смещении от несущей на 20 кГц и полосе частот 1 Гц (с опцией SMA-B22 менее 136 дБн).
- Время установления частоты в режиме скачки и списки менее 450 мкс (!).
- Основные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ и импульсная (с встроенным импульсным модулятором).
- Управление прибором вручную или дистанционно по интерфейсам LAN, IEEE-488 и USB.
- Габаритные размеры прибора 427×88×450 мм, масса 10 кг.

Генератор позволяет одновременно осуществить амплитудную, частотную, фазовую и импульсную модуляции как от внутреннего генератора модулирующего сигнала, так и от внешнего (при подаче сигнала на внешний вход). Большой динамический диапазон часто позволяет обойтись без усиления выходного сигнала.

Генератор может поставляться с дополнительными опциями, например:

- SMA-B29 — синтезатор тактовых сигналов с частотой до 1,5 ГГц и малым джиттером.
- SMA-K23 — генератор импульсов с длительностью от 20 нс до 1 с и периодом повторения от 100 нс до 85 с.
- SMA-K24 — низкочастотный генератор сигналов с частотами до 1 МГц и функциональный генератор с частотами до 10 МГц.

Генератор имеет непревзойденные характеристики по уровню фазовых шумов и времени установления частоты. Синусоидальный сигнал генератора имеет очень малый уровень высших гармоник сигнала и малый уровень широкополосного шума. Это говорит о том, что генератор идеально подходит под те применения и измерения, которые требуют использования чистого гармонического сигнала в широком диапазоне частот.

С июля 2007 г. фирма R&S начала поставки нового усовершенствованного генератора SMB100A с частотным диапазоном частот от 9 кГц до 6 ГГц. Время установления частоты 1,6 мс, а в режиме списка менее 1 мс. Остальные характеристики нового гене-

ратора близки к уже описанным для генератора SMA100A. Прибор имеет прочный корпус с обрешиненными углами, защищающими его от ударов.

Еще один новый прибор SMF100A имеет частотный диапазон до 22 ГГц и отличается особой чистотой генерируемого сигнала.

1.9.4. Серия генераторов R&S SMP0* с частотами до 20, 27 и 40 ГГц

Серия ВЧ/СВЧ-генераторов R&S SMP0* состоит из трех генераторов, перекрывающих широкий диапазон частот от 2 до 20, 27 и 40 ГГц. Нижняя граница частотного диапазона при необходимости может быть снижена до 10 МГц. Внешний вид генераторов этой серии показан на рис. 1.45.



Рис. 1.45. Внешний вид генератора SMP04 фирмы R&S

Краткие технические характеристики генераторов серии SMP:

- Частотный диапазон от 2 до 20 (SMP02), 27 (SMP03) и 40 (SMP04) ГГц, с возможностью расширения вниз до 10 МГц с помощью опции SMP-B11.
- Разрешение по частоте 0,1 Гц.
- Стабильность частоты опорного генератора после 30-дневного старения не более $1 \cdot 10^{-6}$ в течение года.
- Время установления частоты не более 11 мс + 5 мс/ГГц.
- АМ, ЧМ, ФМ и импульсная (опция) модуляция.
- Габариты прибора 435×192×570 мм, масса 27 кг (со всеми опциями).

Остальные параметры генератора могут в широких пределах меняться в зависимости от примененных опций. Генераторы этого типа — крупногабаритные и довольно тяжелые стационарные приборы. Это не удивительно, учитывая очень высокие максимальные частоты сигналов, которые могут генерировать эти генераторы.

1.9.5. Серия генераторов R&S SMR** с частотами до 60 ГГц

Серия ВЧ/СВЧ-генераторов SMR** фирмы R&S перекрывает диапазон частот от 1 до 60 ГГц. Он может быть расширен снизу до 10 МГц. Приборы имеют стандартное настольное или стоечное оформление (рис. 1.46).



Рис. 1.46. Внешний вид генератора SMR** фирмы R&S

Краткие технические характеристики генераторов серии SMR:

- Частотный диапазон от 1 до 20 (SMP20), 27 (SMP27), 30 (SMP30), 40 (SMP40), 50 (SMP50) и 60 (SMP60) ГГц, с возможностью расширения вниз до 10 МГц с помощью опции SMR-B11.
- Разрешение по частоте 1 кГц (с опцией SMR-B2 до 0,1 Гц).
- Стабильность частоты опорного генератора после 30-дневного старения не более $1 \cdot 10^{-6}$ в течение года.
- Максимальная выходная мощность от +10 дБм на частоте 20 ГГц до 0 дБм на частоте 60 ГГц.
- Расширение динамического диапазона вниз до -130 дБм при установке аттенюатора (опция SMR-B15/-B17).
- Время установления частоты не более 10 мс + 1 мс/ГГц.
- Линейная амплитудная модуляция, внутренняя и внешняя с глубиной от 0 до 100%.
- С опцией SRM-B5 логарифмическая амплитудная модуляция с динамическим диапазоном 30 дБ.
- Частотная модуляция (девиация зависит от частоты сигнала).
- Модуляция ASK с глубиной до 90% и частотой передачи данных от 0 до 200 кГц (при установке опции SMR-B5) и модуляция FSK с частотой передачи данных от 0 до 200 МГц.
- НЧ-генератор синусоидального и прямоугольного напряжений с частотой от 0,1 Гц до 10 МГц (при установке опции SMR-B5).
- Цифровая и линейная (с опцией SMR-B4) развертки.
- Габариты прибора 426,7×87,6×450 мм, масса прибора не более 12 кг со всеми опциями.

Остальные параметры генератора могут в широких пределах меняться в зависимости от примененных опций.

1.9.6. Векторное представление сигналов и цифровая модуляция

В ряде случаев используется *векторное представление* синусоидальных сигналов, например гармоник сложного сигнала. При нем амплитуду и фазу можно рассматривать как длину и угол поворота вектора в полярной системе координат. Такое же рассмотрение подходит и для декартовой (прямоугольной) системы координат (X,Y). При этом I представляет горизонтальную компоненту (X), а Q — вертикальную компоненту (Y) (рис. 1.47). Для хранения выборок сигнала в данном случае используется формат I/Q -выборок.

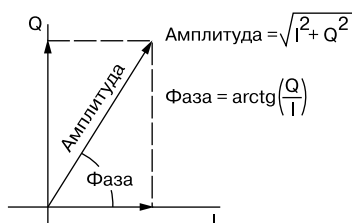


Рис. 1.47.
Векторное представление сигнала (гармоники)

В настоящее время число видов модуляции резко возросло. В частности, в современных системах связи, наряду с уже рассмотренными амплитудной, частотной и фазовой модуляцией, широко используются различные виды *цифровой модуляции*, основанные на векторном представлении сигналов. Подлежащие демодуляции сигналы при этих видах модуляции представлены на рис. 1.48 и иллюстрируют различные принципы демодуляции сигналов с различными видами модуляции.

Рассмотрим особенности некоторых видов цифровой модуляции. *Квадратурная фазовая манипуляция* — цифровой формат модуляции, в котором точки распознавания символов появляются при сдвиге по фазе на 90 градусов. *Квадратурная амплитудная модуляция* — формат модуляции высокого порядка, в котором амплитуда и фаза изменяются непрерывно, обозначая множество состояний. Даже такие сложные виды модуляции как *ортогональное мультиплексирование частотным делением* можно разложить на амплитудные и частотные компоненты.

Демодуляция АМ-сигналов состоит в вычислении мгновенной амплитуды для каждой выборки I/Q , сохраненной в памяти, и развертки результатов во времени. Демодуляция ФМ-сигналов состоит в вычислении фазового угла выборок I и Q , сохраненных в памяти, и развертки их во времени после устранения разрывов функции арктангенса в районе значений ± 90 градусов. После вычисления фазовой траектории в виде записи во времени ФМ вычисляется путем дифференцирования по времени.

В число многочисленных разновидностей цифровой модуляции входят такие известные форматы, как частотная манипуляция, двухпозиционная фазовая манипуляция, квадратурная фазовая манипуляция, гауссова манипуляция с минимальным сдвигом, квадратурная амплитудная модуляция, ортогональное мультиплексирование частотным делением и другие. Цифровая модуляция в сочетании с назначением каналов, фильтрацией, управлением мощностью, коррекцией ошибок и протоколами связи часто

представляет целый стандарт цифровой связи, предназначенный для безошибочной передачи битов информации по радиоканалу.

Рис. 1.49 показывает типичную функциональную схему тракта передача-прием линии связи цифровой модуляцией. Из него видны преобразования компонент I и Q сигнала.

Процесс передачи в тракте (рис. 1.49) начинается с поступления передаваемых данных и тактового сигнала. Данные и тактовый сигнал проходят через шифратор, который переупорядочивает данные, добавляет биты синхронизации, выполняет помехоустойчивое кодирование и шифрование. Затем данные разделяются по трактам I и Q и фильтруются. Таким образом, они превращаются в аналоговые сигналы, которые подвергаются преобразованию с повышением частоты до соответствующего канала и передаются в эфир. Между передачей и приемом сигнал неизбежно ухудшается вследствие воздействия окружающей среды.

Прием сигнала происходит в порядке, обратном передаче, с несколькими дополнительными шагами. Радиосигнал преобразуется с понижением частоты в сигналы модуляции I и Q , которые пропускаются через фильтры приемника, рассчитанные на удаление межсимвольных помех. Затем сигнал обрабатывается по алгоритму, восстанавливающему частоту, фазу и синхронизацию данных. Это необходимо для коррекции задержки при многолучевом распространении и доплеровского сдвига в тракте, а также несинхронности локальных гетеродинов передатчика и приемника. После восстановления частоты, фазы и тактовых импульсов сигнал демодулируется и декодируется, выполняется коррекция ошибок и восстановление битов.

Для исследования и испытания систем связи с цифровыми методами модуляции выпускаются специальные векторные анализаторы спектра. Векторное представление сигналов используется также при анализе цепей, в частности в *векторных анализаторах цепей*. Наряду с этими устройствами необходимы и генераторы, дающие сигналы, представленные в векторной форме, и промодулированные различными видами модуляции, в том числе цифровыми. Некоторые фирмы, например Agilent Technologies и ROHDE&SCHWARZ, выпускают подобные генераторы под именем "векторные генераторы". Их отличительная особенность — расширенные функциональные возможности, в частности реализация как известных, так и новых методов цифровой модуляции.

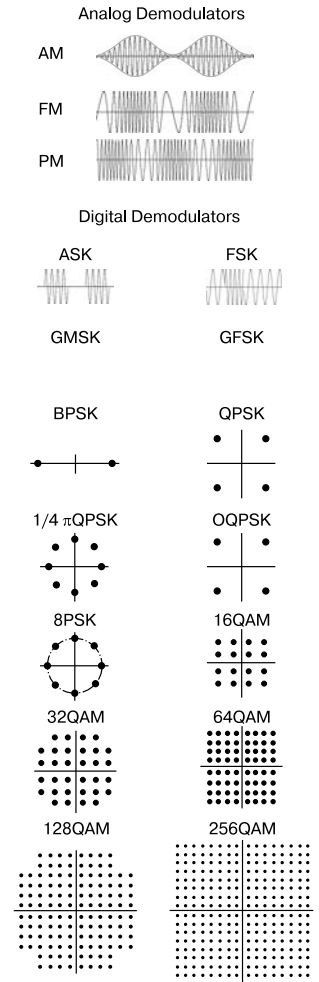


Рис. 1.48. Иллюстрация демодуляции сигналов с различными видами модуляции

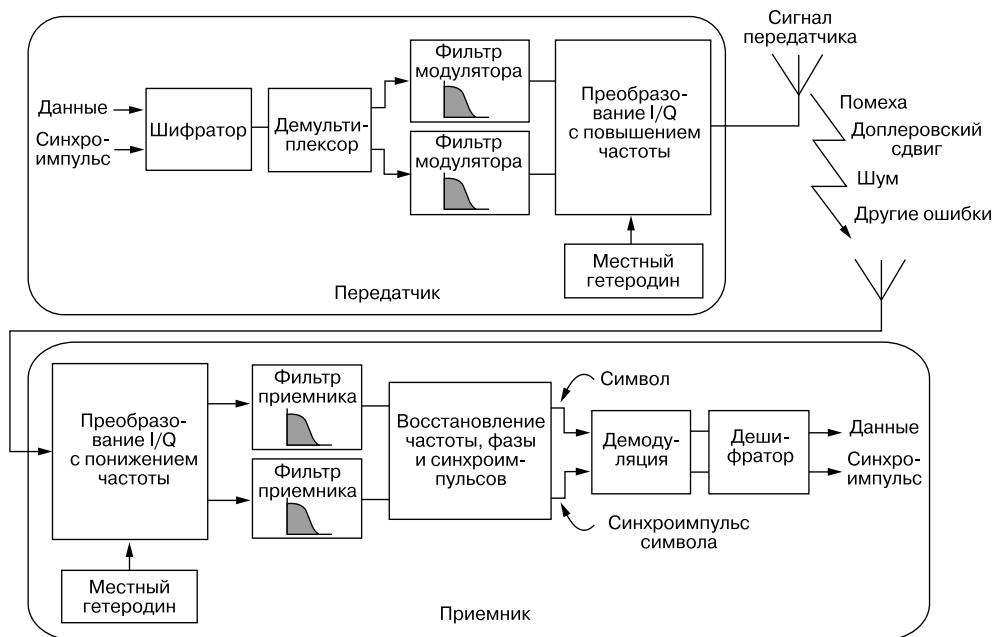


Рис. 1.49. Тракт цифровой радиосвязи

1.9.7. Векторные генераторы фирмы R&S SMU200A/SMJ100A/SMATE200A

Наряду с уже отмеченным векторным генератором SMV03 фирма R&S выпускает ряд моделей других приборов этого класса. На рис. 1.50 представлен внешний вид двухканального векторного генератора SMU200A. Прибор фактически содержит в одном корпусе два независимых генератора, которые могут использоваться отдельно (например, как гетеродины супергетеродинного радиоприемника с двойным преобразованием), так и совместно. Этот прибор в состоянии удовлетворить потребности в испытательных сигналах разработчиков современных систем мобильной связи.

Основные характеристики генераторов SMU200A:

- Два генератора в одном приборе.
- Дополнительные модули на частоты от 100 кГц до 2,2/3/4/6 ГГц для первого ВЧ-тракта.
- Второй ВЧ-тракт с частотами до 2,2 или 3 ГГц.
- Два полноценных канала модуляции.
- Цифровое суммирование сигналов без потерь.
- Модулятор I/Q с полосой частот до 200 МГц.
- Низкий фазовый шум генераторов: -135 дБн на частоте 1 ГГц при расстройке на 20 кГц и полосе частот разрешения 1 Гц.



Рис. 1.50. Внешний вид двухканального векторного генератора SMU200A

- Низкий уровень широкополосного шума: -153 дБн на частоте несущей 1 ГГц при смещении несущей >5 МГц и полосе частот разрешения 1 Гц.
- Высокий уровень выходной мощности: до $+19$ дБм и до $+26$ дБм в режиме перегрузки.
- Встроенный электронный аттенюатор с полосой частот 6 ГГц.
- Высокая точность повторяемости уровня: до $0,05$ дБ.
- Виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, импульсная и кодовая (цифровая).
- Интуитивно понятный графический интерфейс.
- Контекстное представление справочной информации.
- Имитация затухания в реальном времени для 40 трактов замирания в одноканальном режиме и 20 в двухканальном режиме.
- Малое время установления заданной частоты — менее 3 мс, а в режиме списка — менее $0,45$ мс.
- Дистанционное управление по порту GPIB или локальной сети.
- Полноценная связь с персональным компьютером.
- Наличие портов USB для подключения клавиатуры, мыши и флэш-памяти.

Генератор может формировать сложные сигналы и сигналы произвольной формы. Объем выборок 56 Мвыб для составляющих I и Q квадратурных сигналов, 4 бита маркера на каждый образец (256 Мбайт). Цветной дисплей с разрешением 800×600 пикселей формата SVGA позволяет наглядно отображать различную информацию, например, блок-схему векторных измерений — она видна на экране дисплея на рис. 1.50. На рис. 1.51 показана диаграмма затухания 16 -канального сигнала $16QAM$ в тракте Рэлея (одна из реализаций цифровой модуляции).

На рис. 1.52 показан внешний вид еще одного векторного генератора фирмы R&S — SMJ100A. Подробные технические характеристики этого прибора (близкие к приведенным для генератора SMU200A) можно найти в техническом описании прибора и в каталоге продукции фирмы R&S, доступном в Интернете.

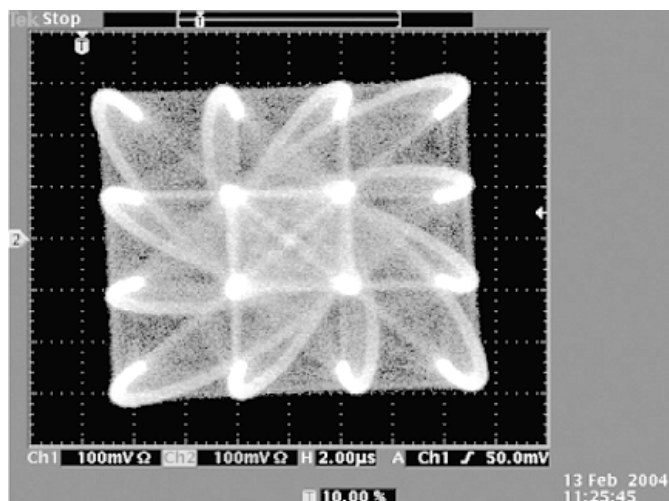


Рис. 1.51. Диаграмма затухания 16-канального сигнала 16QAM в тракте Рэлея



Рис. 1.52. Векторный генератор SMJ100A фирмы R&S

Еще одна серия векторных генераторов SMATE200A с диапазоном частот до 3 или 6 ГГц создана на основе генераторов SMU200A. Необычный вид генераторов SMATE200A (рис. 1.53), в частности полное отсутствие органов управления и дисплея на передней панели, связан с их производственным назначением. Приборы ориентированы на применение в измерительных комплексах, работающих в жестких условиях производства практически без обслуживания.

1.9.8. Векторные генераторы фирмы Model 2910 Keithley

Разумеется, векторные генераторы выпускаются и другими фирмами. Например, фирма Keithley (США, www.keithley) выпускает генератор Model 2910 на диапазон частот от 400 МГц до 2,5 ГГц с разрешением 0,1 Гц и погрешностью около 5 мкГц. Динамический диапазон сигнала на входе от -120 дБм до +13 дБм с разрешением 0,01 дБм и погреш-

ностью 0,3 дБ. Время установления заданной частоты и заданной амплитуды не более 1,6 мс. Габариты прибора 133×213×464 мм, масса не более 8 кг. Внешний вид прибора спереди показан на рис. 1.54. Прибор имеет сенсорный экран.



Рис. 1.53. Внешний вид векторных генераторов серии SMATE200A фирмы R&S



Рис. 1.54. Внешний вид векторного генератора Model 2910 фирмы Keithley

Этот генератор специально предназначен для тестирования, отладки и исследования аппаратуры мобильной связи. Он имеет встроенный генератор цифровых сигналов основных форматов сотовой связи: GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, cdmaOne, cdma2000. Есть также генератор шума и генератор сигналов произвольной формы с квадратурными составляющими — объем памяти 256 Мбайт для I и Q составляющих.

Управление генератором может производиться органами управления передней панели или дистанционно с помощью интерфейсов USB, GPIB и LAN. При подключе-

нии к компьютеру можно создавать и редактировать формы сигналов с помощью программ — систем компьютерной математики Mathcad и MATLAB, а также с помощью программы автоматизации измерений LabVIEW.

Model 2910 является первым генератором ВЧ-сигналов, удовлетворяющим новому стандарту LXI.

1.10. Генератор со сверхмалыми нелинейными искажениями DS360 фирмы Stanford Research Systems

Особняком среди генераторов с цифровым синтезом сигнала стоит генератор фирмы Stanford Research Systems DS360 (рис. 1.55). Этот прибор на российском рынке предлагает компания "Прист". Внешне ничего необычного в приборе нет — типичный генератор с цифровым синтезом частоты сигнала и кнопочным управлением. Однако прибор является уникальной комбинацией генератора с ультранизкими гармоническими искажениями (коэффициент гармоник менее 0,0005%) и шумами (THD < 0,001% в диапазоне до 20 кГц) и технологии прямого цифрового синтеза, обеспечивающей высокую точность и дискретность установки частоты сигнала.

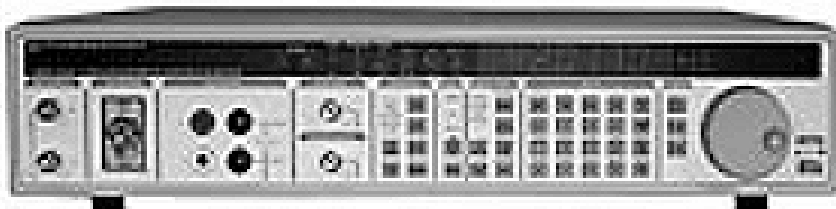


Рис. 1.55. Внешний вид генератора DS360 фирмы Stanford Research Systems

Краткие технические характеристики DS360:

- Частотный диапазон 10 мГц ... 200 кГц.
- Низкий уровень гармонических искажений - 100 дБн (до 20 кГц).
- Формы сигнала: синус, меандр, двухчастотный, белый и розовый шум.
- Диапазон выходных напряжений от 20 мкВпик до 40 Впик.
- Симметричный и несимметричный выходы.
- Режим ГКЧ.
- Погрешность установки частоты $25 \cdot 10^{-6}$.
- Интерфейс RS-232 и КОП.

Генератор DS360 является идеальным инструментом для акустических измерений. Наряду с прецизионными метрологическими характеристиками (см. выше) генератор имеет и специальные виды выходных сигналов. Помимо синуса и меандра генератор

формирует белый и розовый шум, имеет функцию свипирования с линейным и логарифмическим законами и возможность создания двухтонового сигнала.

Генератор DS360 имеет различные типы выходных разъемов, которые обеспечивают совместимость с любой системой: симметричный и несимметричный, BNC и XLR, а также опционально устанавливаемые цифровые выходы. Широкие возможности по формированию сигналов обеспечиваются насыщенным меню управления, а также поддержкой удаленного управления по интерфейсам RS-232 и КОП.

1.11. Генераторы качающейся частоты (ГКЧ) и измерители АЧХ

1.11.1. Промышленные ГКЧ и измерители АЧХ

Генераторами качающейся частоты (ГКЧ) или свип-генераторами называют генераторы, частота которых меняется обычно изменением некоторого управляющего напряжения. Чаще всего частота меняется с помощью варикапов или (в функциональных генераторах) изменением токов заряда и разряда времязадающего конденсатора. Закон изменения частоты может быть линейным или логарифмическим.

Для получения изменения частоты в широких пределах используется принцип смещения двух частот с помощью смесителя. Одна частота меняется в пределах от f_0 до $f_0 + \Delta f$, а вторая частота $f_0 = \text{const}$. Смеситель выделяет разностную частоту, которая меняется от 0 до Δf .

На основе ГКЧ строятся измерители амплитудно-частотных (или просто частотных) характеристик (АЧХ) [60, 61]. Это одни из весьма эффективных и полезных, но сложных приборов, применяемых при регулировке и настройке различных электронных устройств. Например, таких, как активные фильтры на операционных усилителях, резонансные цепи, частотные дискриминаторы, усилители, радиоприемники, телевизоры и т. д. Любопытно отметить, что первый отечественный ламповый измеритель частотных характеристик ИЧХ-1 был весьма громоздким прибором массой в 200 кг (!). Он позволял снимать АЧХ в диапазоне частот от 0,1 до 20 МГц при девиации частоты до 4 МГц.

В СССР в середине 80-х годов прошлого века был освоен массовый выпуск вполне современного по тем временам измерителя АЧХ Х1-50. Небольшой, напоминающий осциллограф, прибор (рис. 1.56) предназначен для исследования АЧХ и настройки ВЧ- и СВЧ-узлов с воспроизведением АЧХ на экране ЭЛТ. Прибор Х1-50 применяется при производстве, настройке и ремонте радиоэлектронной аппаратуры в лабораториях и цехах, ремонтных мастерских, а также в качестве сервисного прибора при ремонте телевизоров на дому.

Характеристики Х1-50:

- Широкий диапазон частот: 0,36-1002 МГц (0,36-436, 434-636 и 636-1002 МГц).



Рис. 1.56. Измеритель АЧХ X1-50

- Отчет частоты: по цифровому индикатору в точке останова развертки и по меткам.
- Полоса качания частоты: в узкополосном режиме 0,5–20 МГц, в широкополосном режиме от $0,01f_{\text{макс}}$ до всего поддиапазона.
- Частотные метки (кварцованные): через 1 и 10 МГц.
- Выходное напряжение ГКЧ: синусоидальное со стабильной амплитудой около 100 мВ на нагрузке 75 Ом.
- Неравномерность собственной АЧХ: в максимально узкой полосе качания $\pm 0,5$ дБ, в широкой полосе качания $\pm 1,5$ дБ.
- Пределы ослабления выходного напряжения 0–50 дБ.
- Чувствительность канала вертикального отклонения, мм/мВ: без детекторов — 10; по входу согласованной детекторной головки — 1.
- Входное сопротивление и емкость высокоомной детекторной головки: 10 кОм и 2 пФ.
- Встроенный генератор сетчатого поля для испытания видеотракта телевизоров.
- Режим использования в качестве осциллографа с автоколебательной разверткой.
- Потребляемая мощность: 70 ВА.
- Масса: 8,5 кг.
- Габариты: 308×304×133 мм.

Приведем краткие данные еще по нескольким измерителям АЧХ отечественного производства.

ТЕСТ-2

Диапазон частот 1–1000 МГц, полоса качания: 0,5–20 МГц и $0,01f_{\text{макс}}$ –1000 МГц. Габариты 308×133×304 мм, масса 8,5 кг. Есть возможность измерения КСВ (коэффициента стоячей волны).

X1-40

Диапазон частот 20 Гц – 1 МГц, плавно изменяется полоса качания, габариты 495×475×255 мм, масса 35 кг. Предназначен для исследования низкочастотных устройств.

X1-42

Диапазон частот 1–1250 МГц, два блока с размерами 488×173×507 и 488×173×507 мм, общая масса 45 кг.

X1-48

Диапазон частот 0,1–150 МГц (три поддиапазона: 0,1–1,5 МГц, 1–15 МГц и 10–150 МГц), размеры 480×170×490, масса 14 кг. Предназначен для исследования радиоприемных и телевизионных устройств с частотами до 150 МГц.

X1-54

Диапазон частот 0,1–150 МГц, полоса качания 1500 Гц – 5,7 МГц или 1 500 Гц – 150 МГц, микропроцессорное управление, самодиагностика, диалоговый режим, 2 блока с размерами 490×135×475 и 490×215×475 мм, общая масса 36 кг.

X1-55

Диапазон частот 1–1400 МГц, полоса качания 0,1–11 МГц, 0,3–132 МГц и 3–1400 МГц, микропроцессорное управление, самодиагностика, диалоговый режим, 2 блока с размерами 488×173×507 и 488×173×507 мм, общая масса 46 кг.

X1-56

Диапазон частот 1–250 МГц (3 поддиапазона: 1–10 МГц, 5 Гц – 50 МГц и 25–250 МГц), микропроцессорное управление, максимальный уровень сигнала 1 мВт; размеры 488×507×73 мм, масса 22 кг.

Нетрудно заметить, что большинство приборов этого типа — тяжелые и громоздкие изделия. Они явно не предназначены для массовых измерений. Поэтому помимо промышленных измерителей АЧХ полезны альтернативные средства, пригодные для снятия АЧХ, например, на основе применения массовых функциональных генераторов с управляемой в широких пределах частотой. Их описание читатель найдет в главах 3 и 5.

1.11.2. Работа с измерителем АЧХ X1-50

При всей привлекательности функциональных генераторов в роли НЧ и ВЧ ГКЧ они имеют ряд недостатков:

- большинство функциональных генераторов имеют низкие максимальные частоты (даже с учетом возможности применения высших гармоник), не выходящие за пределы 30 МГц;
- стабильность частоты низка для испытаний высокоизбирательной ВЧ-аппаратуры, например кварцевых и LC-фильтров;
- трудно получить малые калиброванные изменения частоты в ходе качания;
- отсутствуют метки для точного измерения частоты.

Эти недостатки делают по-прежнему актуальной разработку и применение ВЧ- и СВЧ-измерителей АЧХ. К сожалению, достаточно доступные приборы этого класса на нашем рынке ныне отсутствуют (не считая описанного выше Х1-50 и узко специализированных приборов для настройки телевизоров). В связи с этим ограничимся описанием работы с прибором Х1-50, который до сих пор популярен в службах сервиса и ремонта (особенно телевизоров) и среди опытных радиолюбителей. Это небольшой прибор с массой чуть больше 8 кг.

Варианты функциональных схем измерения АЧХ представлены на рис. 1.57. Схема рис. 1.57, а используется для проверки качества работы прибора. В ней сигнал с выхода напрямую подается на широкополосную низкоомную коаксиальную детекторную головку с германиевым диодом, а с ее выхода — на вход осциллографа прибора. На выходе формируются две в идеале параллельные линии — нулевого отчета и выхода детекторной головки. Линия нулевого уровня формируется при обратном ходе развертки путем блокирования выхода сигнала.

В общем случае (снятие АЧХ четырехполосников — рис. 1.57, б) сигнал с выхода ГКЧ — дБ подается на исследуемое устройство, а с его выхода на детекторную головку. При необходимости сигнал можно ослабить в диапазоне уровней ослабления от 0 до 50 дБ. Обычно используется высокоомная детекторная головка. В случае исследования 75-омных четырехполосников можно использовать более широкополосную низкоомную детекторную головку, выполненную в виде коаксиального переходника.

Схема рис. 1.57, в используется, если входное или выходное сопротивления исследуемых четырехполосников отличается от 75 Ом (например, равно 50 Ом). В этом случае следует использовать прилагаемые к прибору коаксиальные переходники. Следует тщательно следить за согласованием входных и выходных цепей, поскольку при его отсутствии возможны очень сильные искажения АЧХ.

На рис. 1.58 показан вид части передней панели прибора Х1-50 с АЧХ широкополосного 50-мегагерцового усилителя (милливольтметра В3-40). Надписи на рисунке поясняют назначение основных органов управления прибора и назначение деталей осциллограммы АЧХ.

Осциллограммы АЧХ, получаемые прибором Х1-50, нередко далеки от тех, которые обычно приводят в учебниках по радиотехнике и нуждаются в некоторой интерпретации. Во-первых, надо отметить, что прибор формирует нулевую линию отсчета (на рис. 1.58 она показана в нижней части экрана). Во-вторых, при работе в первом частотном поддиапазоне генерируемые частоты получаются в результате смещения

частот от двух СВЧ-генераторов. Поэтому в левой части АЧХ отчетливо виден провал почти до нуля напряжения, соответствующий нулевой разностной частоте и зоне нечувствительности прибора (она составляет 300–400 кГц). В-третьих, на самой АЧХ можно наблюдать также частотные метки типа нулевых биений, создаваемые кварцевым генератором частотных меток. Эти метки могут иметь частоты 10 или 1 МГц. По ним (амплитуда регулируется ручкой метки МГц — на рис. 1.58 не видна) можно грубо отсчитывать частоты.

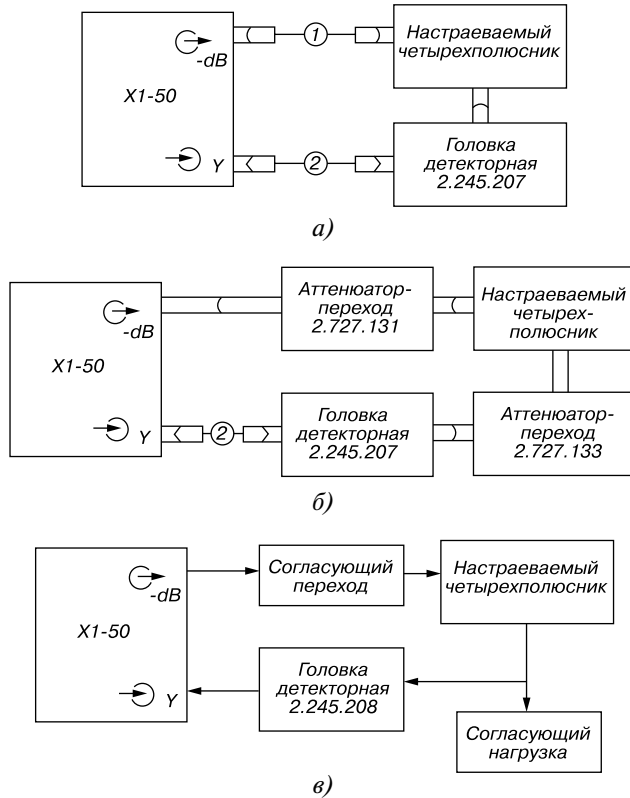


Рис. 1.57. Основные функциональные схемы применения измерителя АЧХ X1-50:
 а — самоконтроль прибора,
 б — снятие АЧХ согласованных четырехполюсников,
 в — четырехполюсников с сопротивлением, отличным от 75 Ом

Наконец, в-четвертых, на АЧХ хорошо видна яркая точка останова (выглядит как светлый кружок на рис. 1.58), которая формируется полочкой останова генератора развертки ГКЧ прибора. Эта точка служит для отсчета частоты, которую можно измерить встроенным цифровым частотомером с разрешением 1 МГц. Для этого надо нажать кнопку СЧЕТ. Изображение в этом случае мигает (частота миганий задается реле) и можно отсчитать частоту по индикатору частотомера (справа и выше экрана).

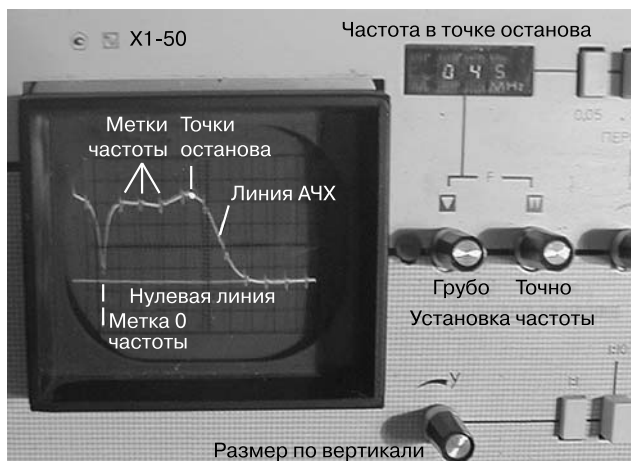


Рис. 1.58. Часть передней панели прибора X1-50 с осциллограммой АЧХ

Прибор позволяет также формировать метки от внешнего генератора синусоидальных сигналов, сигнал которого подается на вход ВНЕШ. При этом формируется одна метка (впрочем, как показала практика, можно наблюдать и метки на гармониках внешнего генератора), что облегчает отсчет частоты в интересующих пользователя местах АЧХ. Для измерения частоты меток можно использовать встроенный в прибор цифровой частотомер. Возможно переключение полярности осциллографического входа и плавное и грубое (делителями 1:1, 1:10 и 1:100).

Применение прибора в качестве обычного простого осциллографа и генератора сеточного поля (выход ГЕНЕР.) в особых комментариях не нуждается. В ЗИП прибора имеется ряд насадок для изменения параметров входной цепи осциллографа и набор щупов, игл и петель. Диапазон частот осциллографа ограничен сотнями кГц, развертка только автоколебательная. На роль серьезного осциллографа прибор явно не претендует.

С применением X1-50 есть ряд проблем. Малый размер экрана и отсутствие подсветки масштабной сети затрудняют фотографирование АЧХ. Точность отсчета (особенно уровня) невелика, так что прибор вряд ли сойдется для точных количественных измерений — скорее, он служит для качественного представления графика АЧХ достаточно широкополосных устройств диапазона ВЧ и СВЧ. Стабильность частоты генератора при частотах ниже 10 МГц явно не удовлетворительная. Малый уровень выходного сигнала (около 100 мВ) исключает применение кремниевых диодов в детекторных головках, и даже при применении германиевых диодов дает заметную нелинейность передаточной характеристики детектора — зависимости выходного постоянного напряжения от уровня входного синусоидального сигнала (выхода ГКЧ).

При использовании низкоомной (75 Ом) согласованной детекторной головки заметно уменьшается выходное напряжение ГКЧ, и АЧХ приходится рассматривать при максимальной чувствительности осциллографа. Немало проблем создает и довольно низкое входное сопротивление даже высокоомной детекторной головки (10 кОм, 2 пФ) и квадратичный (а не линейный) характер передаточной характери-

стики. Это затрудняет исследование высокочастотных резонансных цепей. Для этого пользователю может потребоваться изготовление простой, действительно высокоомной детекторной головки. Для ее питания можно использовать выход маломощного источника питания с регулировкой напряжения от 0 до -12 В, который есть на задней стенке прибора.

В целом надо отметить, что измеритель АЧХ Х1-50 ориентирован на исследование достаточно широкополосных устройств, например, трактов телевизионных приемников, видеоусилителей, СВЧ-цепей и т. д. Он (без дополнительных согласующих устройств) плохо подходит для исследования узкополосных и сравнительно низкочастотных устройств, например, радиоприемных или усилительных. Для такого исследования куда лучше применять функциональные генераторы в роли ГКЧ (см. главу 5). Применение Х1-50 для настройки телевизионных устройств довольно подробно описано в инструкции по эксплуатации этого прибора.

1.12. Гетеродинные индикаторы резонанса (ГИР)

1.12.1. Назначение и принципы работы ГИР

Гетеродинные индикаторы резонанса (ГИР) — это простые измерительные приборы, предназначенные для обнаружения и индикации резонанса в радиоэлектронных устройствах, содержащих резонансные цепи. Обычно ГИР представляет собой небольшую коробочку, в которой смонтирован LC -генератор синусоидальных колебаний и измеритель потребляемого им тока или простой индикатор ВЧ-сигнала. Катушка генератора сменная и устанавливается на колодке, конденсатор переменной емкости (воздушный или слюдяной) имеет шкалу, отградуированную (для каждой сменной катушки) по частоте.

Если поместить катушку ГИР вблизи резонансного контура, то при приближении частоты настройки генератора к частоте контура начнется отсос энергии генератора в контур. Это хорошо заметно даже тогда, когда катушка ГИР удалена от контура на расстояние в несколько сантиметров. При отсосе меняется потребляемый генератором от источника питания ток, что и позволяет определить момент резонанса.

ГИР довольно удобный прибор. Обычно его применение даже не требует подключения к испытываемой цепи. При испытании радиоприемника могут быть оценены частоты настройки входных контуров, контуров усилителя промежуточной частоты и контуров гетеродина. Часто ГИР используется для определения резонансной частоты антенн, например коротковолновых радиостанций, а также резонансных частот фидеров и отрезков коаксиальных кабелей.

В СССР выпускались серийно приборы ГИР-1 и ГИР-2. Однако ГИР не относится к профессиональным приборам из-за невысокой точности измерений и сильного влияния на испытываемое устройство. Тем не менее, ГИР широко распространены в радио-

любительской практике. Описания этих полезных приборов можно найти в радиоловительской литературе (например, в подборках журнала "Радио") и в Интернете.

1.12.2. Простой ГИР на одном полевом транзисторе

В Большой Советской Энциклопедии был описан ГИР на ламповом триоде. В наше время куда удобнее применить полевой транзистор. На рис. 1.59 показана схема простейшего ГИР на полевом транзисторе, часто встречающаяся в Интернете. Это типичная схема индуктивной трехточки.

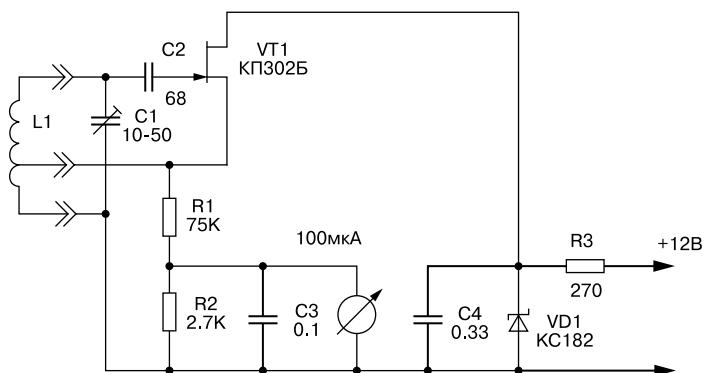


Рис. 1.59. Схема простейшего ГИР на полевом транзисторе

Конструктивно этот ГИР монтируется в небольшой металлической коробочке. На лицевой панели устанавливается индикаторный прибор и конденсатор переменной емкости, снабженный шкалой настройки. На боковой стороне корпуса устанавливается разъем, к которому подключается катушка индуктивности $L1$.

Для перекрытия диапазона 25–40 МГц катушка имеет следующие параметры: диаметр каркаса 20 мм, длина намотки 30 мм, обмотка состоит из 9 витков провода ПЭВ-2 диаметром 1,6 мм с отводом от второго витка (считая от нижнего по схеме). При использовании набора сменных катушек прибор перекрывает диапазон частот от 3,0 до 150 МГц. ГИР используется для определения резонансных частот LC контуров, антенн и отрезков коаксиального кабеля. Как отмечалось, работа прибора основана на поглощении высокочастотной энергии исследуемым контуром или антенной в момент совпадения их собственной резонансной частоты и частоты настройки ГИР. В этот момент показания индикаторного прибора имеют резкий провал. Этот провал тем больше, чем сильнее связь между ГИРом и колебательным контуром и чем выше добротность этого контура.

Для точного измерения резонанса необходимо, чтобы ГИР был индуктивно связан с антенной в точке пучности тока. Как известно, пучность тока располагается на расстоянии $1/4$ длины волны от конца вибратора. К этой точке и следует подносить ГИР. Изменяя частоту настройки прибора, находят минимум показаний индикатора и счи-

тывают в этот момент соответствующую частоту со шкалы. Эта частота и является резонансной частотой антенны. Необходимо помнить, что индикация резонанса происходит не только на основной частоте, но и на гармониках.

Если частота резонанса антенны измеряется в непосредственной близости от земли, то она смещается в сторону более низких частот. При подъеме антенны на мачту резонансная частота сместится вверх на 0,2–0,4 МГц. Используя ГИР, можно подобрать длину коаксиального кабеля для работы в режиме настроенной линии передачи (электрическая длина такой линии равна целому числу полуволн). Для этого один конец кабеля закорачивают, а к другому подносят ГИР и определяют резонанс вблизи частоты 27 МГц. Постепенно укорачивая кабель, добиваются резонанса на средней частоте используемого диапазона.

1.12.3. ГИР на транзисторном аналоге негатрона

Интересная схема ГИР приведена в [132] (рис. 1.60). В ней используется транзисторный аналог негатрона с N -образной ВАХ на основе двух биполярных транзисторов Т1 и Т2. Благодаря этому контур генератора не требует отводов и отдельных цепей положительной обратной связи. На полевом транзисторе Т3 и операционном усилителе построен высокочувствительный детектор ВЧ-напряжения со стрелочным индикатором.

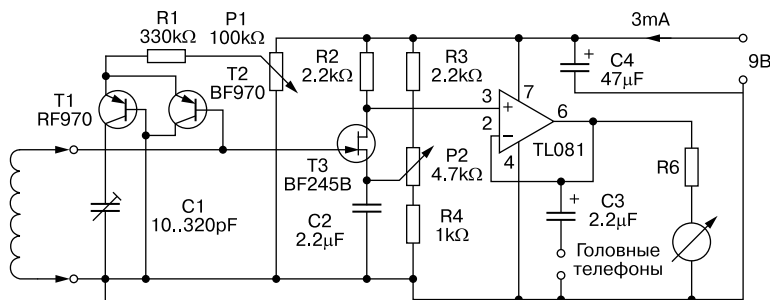


Рис. 1.60. ГИР на транзисторном аналоге негатрона

Этот ГИР может служить индикатором работы внешних генераторов и обычным индикатором резонанса в пассивных резонансных цепях. Резистором-потенциометром Р1 можно устанавливать режим отсутствия генерации или ее наличия. При отсутствии генерации прибор реагирует на внешнее ВЧ-излучение: если частота настройки близка к частоте этого излучения, показания индикатора возрастают. Можно также задать режим генерации, при которой стрелка индикатора отклоняется на заданную установку потенциометра Р2 величину. Тогда, если частота генератора совпадает с частотой внешней резонансной цепи, показания индикатора уменьшаются из-за отсоса энергии от генератора внешней цепью.

В [132] можно найти данные катушек ГИР в диапазоне частот от 1,3 до 50 МГц. Описан также вариант схемы с амплитудной модуляцией сигнала генератора. Это позволяет более точно определять резонанс по звучанию телефонов.

Генераторы ИМПУЛЬСОВ

Генераторы импульсов находят очень широкое применение в качестве источников не-синусоидальных сигналов. Они необходимы для тестирования и отладки импульсных систем, например радиолокаторов, и цифровых систем и устройств различного назначения. В этой главе описаны импульсные сигналы, их параметры, методы генерации таких сигналов и выпускаемые серийно генераторы импульсов. Особое внимание уделено описанию генераторов коротких (вплоть до пикосекундных) импульсов.

2.1. Импульсные сигналы и принципы их генерации

2.1.1. Формы и параметры импульсов

Синусоидальные сигналы характеризуются плавностью. Временная зависимость их не содержит резких скачков, сигналы легко дифференцируются, и производная их в любой точке конечна. Более того, у них непрерывны все производные, и все они имеют форму гармонических колебаний. Благодаря непрерывности и стационарности синусоидальные сигналы, наряду с постоянными напряжениями и токами, хорошо подходят для длительной передачи энергии по проводам или в пространстве (в виде электромагнитных волн).

Однако часто нужна передача большой энергии, выделяемая в короткое время. Наглядным примером тут является радиолокация. При ней короткий и мощный *импульс* электромагнитного излучения посылается в пространство, отражается от цели и воспринимается радиолокационным приемником. Это по времени задержки отраженного сигнала позволяет оценить расстояние до цели, а детальный анализ отраженного импульса позволяет нередко судить о характере цели. Импульсные сигналы нужны и в целом ряде других применений, например для запуска мощных лазерных диодов, построения ультразвуковых и видеоимпульсных локаторов, запуска ядерных и термо-ядерных процессов и даже при испытании многих электронных устройств, использующих импульсные сигналы или отдельные их свойства [10-18].

На рис. 2.1 показаны основные идеализированные формы *импульсных сигналов*. Наиболее распространенными являются прямоугольные импульсы, в частности сим-

метричные — *меандр*. Довольно широко применяются и пилообразные и треугольные импульсы. Они находят применение в генераторах развертки аналоговых осциллографов и в функциональных генераторах (см. главу 3).

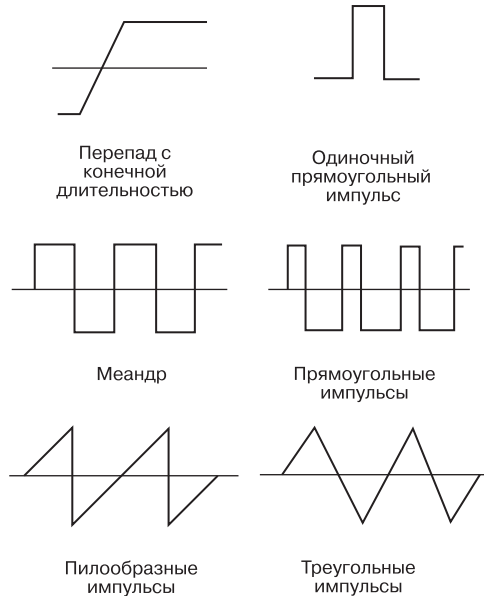


Рис. 2.1. Основные идеализированные формы импульсов

Измерительные генераторы импульсов должны вырабатывать импульсы, которые, по возможности, близки к импульсам идеальной формы (рис. 2.1). Однако, *реальные импульсы*, даже напоминающие прямоугольные, отличаются от идеальных. Так, перепады бесконечно малой длительности практически не реализуемы, так что фронты реальных прямоугольных импульсов всегда имеют конечную длительность. На рис. 2.2, а приведена форма реального импульса и обозначены его основные параметры. Такую форму приобретают даже близкие к идеальным прямоугольные импульсы после прохождения через усилители и различные искажающие цепи.

Для реального импульса используются следующие технические параметры:

- Амплитуда импульса A или его высота (без учета возможных кратковременных выбросов).
- Активная длительность импульса, отсчитываемая на уровне $0,5 A$.
- Время нарастания импульса или длительность переднего фронта, отсчитываемая на уровнях от $0,1$ до $0,9 A$.
- Время спада или длительность заднего фронта, отсчитываемая на уровнях $0,9$ до $0,1 A$.
- Время задержки — время с нулевого момента времени до момента времени, при котором уровень сигнала достигает $0,1 A$.

- *Уровень спада вершины ΔA* — относительный уровень спада почти горизонтальной вершины импульса.

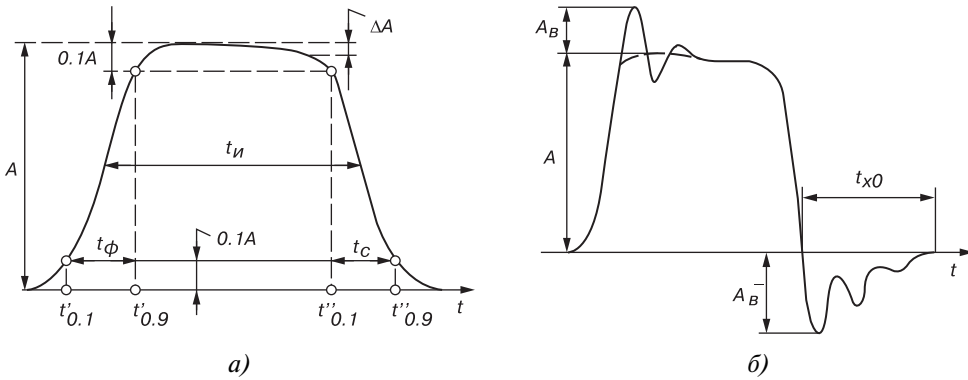


Рис. 2.2. Форма реального импульса без коротких выбросов (а) и с такими выбросами (б)

Конечные длительности *фронтов импульсов* обусловлены инерционностью активных приборов, на которых строятся импульсные генераторы, и ограничением усиливаемой ими полосы частот сверху. Спад вершины обусловлен разделительными *RC*-цепями и спадом усиления каскадов усиления (при использовании усилителей переменного напряжения). Его удастся избежать применением усилителей постоянного напряжения, например интегральных дифференциальных усилителей.

В схемах реальных генераторов импульсов всегда присутствуют паразитные индуктивности и емкости, которые нередко образуют паразитные колебательные контуры. Возбуждаемые фронтами импульсов малой длительности (доли-единицы нс), они часто создают после них характерные *выбросы* и даже затухающие колебания (рис. 2.2, б). Есть ряд способов устранить их: тщательный монтаж с предельным укорочением всех проводников, применение демпфирующих цепей и ферритовых колец с большими потерями и, наконец, реализация схем в виде полосковых линий, коаксиальных и волноводных конструкций.

Импульсы могут быть *одиночными* и периодически повторяющимися (*периодическими*). Они могут также формироваться *пачками* с заданным числом импульсов в пачке. Все параметры переменного напряжения, описанные в главе 1, применимы и для импульсов. Для периодических импульсов особое значение имеют два взаимосвязанных параметра: *коэффициент заполнения* и *скважность*. Они определяются как:

$$K_3 = t_{и} / T < 1 \text{ и } Q = 1 / K_3 = T / t_{и} > 1, \quad (2.1)$$

где $T = 1/f$ — *период повторения* импульсов. *Частота повторения импульсов* $f = 1/T$ также является важным параметром импульсов. Если пиковая мощность прямоугольного импульса (его площадь) равна $P_{им}$, то средняя усредненная за период мощность $P_{иср} = P_{им} / Q$.

2.1.2. Принципы генерации импульсных сигналов

Хотя существуют многие и многие тысячи импульсных устройств (и схем), есть всего несколько действительно принципиальных методов генерации импульсных сигналов. Так, для создания прямоугольных импульсов используется *метод коммутации* постоянного напряжения или тока. Для коммутации используются различные ключевые приборы: электронные приборы, газовые разрядники, водородные тиратроны, биполярные и полевые транзисторы, интегральные схемы на их основе. Время переключения их определяет времена нарастания и спада импульсов. У некоторых приборов, например у лавинных транзисторов и мощных полевых транзисторов, оно достигает долей нс, а у приборов на арсениде галлия и на гетеропереходах (германий-кремний) достигает сотых и даже тысячных долей нс. Это делает их перспективными для построения высокоскоростных импульсных устройств.

Другой обширный класс импульсных устройств — это *релаксационные генераторы*, или *релаксаторы*. Они строятся на основе *накопителя энергии* — обычно конденсатора, режее катушки индуктивности. Работа релаксаторов основана на накоплении энергии в накопителе и затем ее высвобождении (*релаксации*) после того, как достигнут некоторый порог энергии (напряжения или тока). Релаксаторы могут быть автоколебательными или ждущими. Последние вырабатывают импульсы после подачи в них внешнего запускающего импульса.

Строго говоря, огромное число импульсных устройств (например, мультивибраторы, одновибраторы, генераторы пилообразного напряжения или тока и т. д. и т. п.) являются релаксаторами со специальными цепями заряда и разряда накопителя. Например, обширную группу устройств образуют релаксаторы с накопителями на основе линий — коаксиальных, полосковых, микрополосковых, линий с сосредоточенными постоянными. Разряд (а иногда, напротив, заряд) таких линий с применением режима согласования происходит неизменным током, что и позволяет формировать короткие почти прямоугольные импульсы. Их длительность определяется временем задержки линий.

Для создания пилообразных импульсов используется заряд/разряд конденсатора C неизменным током. Например, напряжение на конденсаторе C при его заряде током $I_0 = \text{const}$ описывается выражением:

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = u(0) + \frac{I_0}{C} t. \quad (2.2)$$

Из (2.2) следует, что в этом случае напряжение растет, начиная с начального уровня $u(0)$, строго по линейному закону. Используя попеременно заряд и разряд конденсатора неизменным током можно формировать треугольное напряжение.

Разумеется, практическая реализация импульсных устройств осложняется применением множества вспомогательных устройств. Например, в релаксаторах класса мультивибраторов приходится использовать ключи на биполярных или полевых транзисторах, оснащенные вспомогательными цепями их управления или усилительные каскады на этих приборах. Для построения генераторов пилообразного напряжения

нужны устройства контроля за напряжением заряда и разряда конденсатора, буферные усилители с высоким входным сопротивлением, цепи температурной стабилизации и т. д.

Построение импульсных устройств реализует *импульсная техника*, которая и является основой построения импульсных генераторов — как самых простых, так и самых сложных, реализующих предельные возможности применяемой в ней элементной базы. Основополагающие принципы построения импульсных устройств изложены в [12-19].

2.1.3. Спектр сигналов

Форма сигнала, как синусоидального, так и импульсного, является его представлением во временной форме — $f(t)$. Во многих, но не во всех, случаях такая форма представления сигнала удобна для его анализа. Но в ряде случаев, например при оценке нелинейных искажений сигналов или при анализе их прохождения через линейные цепи и устройства, преимущества имеются при другой форме представления сигналов — *частотной*.

К примеру, сигнал от широкополосной антенны или от множества радиостанций на экране осциллографа выглядит как шум — разобраться в том, какие сигналы его образуют, какие частоты и амплитуды имеют его составляющие, практически невозможно. Однако при переходе от его представления во временной области к представлению в частотной области сигналы всех радиостанций отчетливо видны на частотной оси анализаторов спектра. Более того, нередко можно определить характер модуляции сигналов.

Для перехода от временной формы $f(t)$ сигнала к его частотному образу $F(\omega)$, в общем случае, используется *прямое непрерывное преобразование Фурье*

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (2.3)$$

Здесь $f(t)$ — скалярная функция независимой переменной t . Спектр при этом является сплошным и характеризует фактически спектральную плотность сигнала как функцию круговой частоты $\omega = 2\pi f$.

Для $f(t)$ в виде синусоидальной или косинусоидальной функции решение (2.3) может быть найдено в замкнутой форме через функцию Дирака. Для синусоидального сигнала — это $-Ai\delta(\omega - \omega_0)$, а для косинусоидального — $Ai\delta(\omega - \omega_0)$. Здесь $\delta(\omega - \omega_0)$ — функция Дирака, равная 1 при $\omega - \omega_0$ (или $\omega = \omega_0$) и 0 во всех других случаях. Таким образом, спектр таких колебаний представляется вертикальной линией с высотой A и частотой ω_0 . При этом линия имеет бесконечно малую толщину.

Хорошо известно, что периодический сигнал любой формы может быть разложен в *ряд Фурье*, содержащий постоянную составляющую и сумму гармонических составляющих (гармоник) с частотами, кратными частоте повторения сигнала — частоте его первой гармоники f_1 . Следовательно, спектр такого сигнала представляет собой ряд вертикальных линий в плоскости амплитуда-частота, расположенных на оси частот в местах, соответствующих частотам kf_1 , где $k=1,2,3,\dots,\infty$.

Для периодических сигналов $y(t)=f(t)$ часто используется следующая форма представления сигнала рядом Фурье:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N M_k \cos(2\pi k f_1 t + \varphi_k), \quad (2.4)$$

Здесь амплитуды гармоник M_k и их фазы φ_k определяются выражениями:

$$M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (2.5)$$

и

$$\varphi_k = -\arctan(b_k/a_k). \quad (2.6)$$

Коэффициенты Фурье рассчитываются по формулам:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(2\pi k f_1 t) dt \quad (2.7)$$

и

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(2\pi k f_1 t) dt. \quad (2.8)$$

Пределы интегрирования в (2.7) и (2.8) могут быть и иными, например от $-T/2$ до $+T/2$, но область интегрирования должна охватывать период T .

На рис. 2.3, а показана форма коротких периодических прямоугольных импульсов, а на рис. 2.3, б их спектр, построенный с применением выражений (2.4) — (2.8). В данном случае для модуля амплитуд гармоник есть аналитическое выражение, которое приведено на графике спектра рис. 2.3, б.

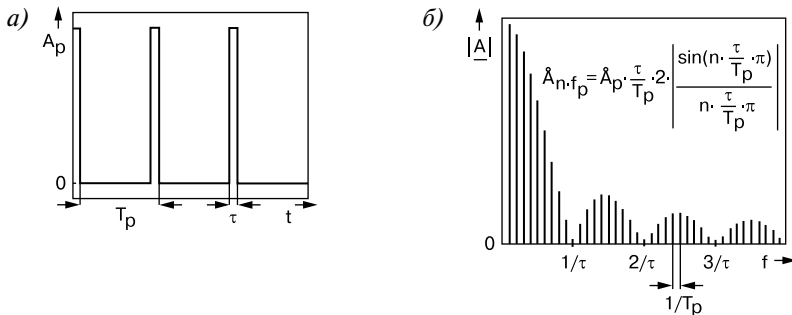


Рис. 2.3. Периодические короткие прямоугольные импульсы (а) и спектр модуля амплитуд их гармоник (б)

Увы, но преобразование (2.3) является теоретической абстракцией, даже если предположить, что сигнал был определен вплоть до текущего момента t . В связи с этим было введено понятие *текущего частотного спектра*, у которого верхний предел в (2.3) заменяется значением t в определенный момент времени [6]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt . \quad (2.9)$$

Здесь мы перешли от функции $F(\omega)$ к функции $S(\omega)$, которая представляет *спектральную плотность* сигнала. Заметим, что часто анализаторы спектра выводят спектр мощности, т. е. величину $S^2(\omega)$, причем с частотой, которая задается в линейном или логарифмическом масштабе.

Выражение (2.9) нетрудно представить в виде:

$$S(\omega) = |S(\omega)| \cdot e^{i\varphi(\omega)t} , \quad (2.10)$$

где *модуль спектральной плотности* на частоте ω

$$|S(\omega)| = \sqrt{S^2(\omega)_{\sin} + S^2(\omega)_{\cos}} \quad (2.11)$$

и аргумент (*фаза*)

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{S(\omega)_{\sin}}{S(\omega)_{\cos}} . \quad (2.12)$$

Здесь синусная и косинусная составляющие спектральной плотности (2.6) определяются выражениями:

$$S(\omega)_{\sin} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt \quad \text{и} \quad S(\omega)_{\cos} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt . \quad (2.13)$$

Было доказано, что если спектр определен на конечном интервале времени T , то остаются справедливыми формулы, полученные из предположения периодичности сигнала. Следовательно, любой детерминированный сигнал, определенный на отрезке времени T его повторения, можно разложить на *конечное число гармоник*. Разумеется, чем оно больше, тем выше точность спектрального анализа и последующего синтеза сигнала.

Обратное преобразование Фурье задается следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega . \quad (2.14)$$

Эта формула позволяет по функции $F(\omega)$ найти в аналитическом виде функцию $f(t)$. Таким образом, осуществляется *синтез сигнала* и его восстановление во временной области.

Приборы, обеспечивающие прямое преобразование Фурье и дающие представление сигналов в виде спектров, получили название *анализаторов спектра* [120]. Не слишком вникая в тонкости их построения и применения (это тема отдельной книги), мы, тем не менее, рассмотрим некоторые их применения, дающие информацию о свойствах и параметрах сигналов.

2.2. Схемотехника простых генераторов импульсов

2.2.1. Импульсные генераторы на транзисторах и интегральных микросхемах

В 60–70-х годах прошлого века импульсные устройства строились преимущественно на дискретных биполярных и реже полевых транзисторах. Биполярные транзисторы в силу их прекрасных ключевых свойств (в частности, низкого остаточного напряжения в режиме насыщения) нашли преимущественное применение. Они широко описаны в литературе по импульсной технике тех лет [12, 15], и в дальнейшем, ввиду общеизвестности, не рассматриваются. Это относится как к импульсным устройствам с RC -цепями (класса *мультивибраторов*), так и к *блокинг-генераторам*, содержащим трансформатор, плохо реализуемый технологически и порождающий специфические искажения импульсов.

Маломощные полевые транзисторы на первых порах резко уступали биполярным как по ключевым свойствам, так и по стабильности генерируемых импульсов и быстродействию. Причиной низкого быстродействия этих приборов была малая крутизна S (отношение приращения тока стока к приращению напряжения на затворе), большие *внешние емкости* структуры приборов и монтажа, которые намного превышали *внутренние емкости* собственно транзисторов.

Однако положение изменилось кардинальным образом после создания мощных полевых транзисторов, которые ныне стали основным типом ключевых устройств и по скорости переключения намного превосходят биполярные транзисторы. Мощные полевые транзисторы имеют структуру из множества параллельно включенных маломощных транзисторов, что увеличивает во много раз крутизну S и рабочие токи транзисторов (ныне они доходят до сотни ампер при рабочих напряжениях до сотен вольт).

Такое построение мощных полевых транзисторов резко снизило долю внешних емкостей и позволило получить времена переключения от долей нс у приборов с токами в доли ампера и до десятков нс для приборов с токами в десятки ампер. Тем не менее, в связи с подробным описанием их схемотехники в книгах [17, 18] схемы на дискретных полевых транзисторах ниже также не рассматриваются, за исключением единичных примеров. Особо высокое быстродействие (времена переключения до нескольких десятков пикосекунд) имеют арсенид-галлиевые полевые транзисторы с затвором на основе барьера Шоттки. К сожалению, это низковольтные приборы — рабочие напряжения на стоке у них не выше десятка вольт.

В конце указанного периода широкое распространение получили схемы на интегральных логических микросхемах и интегральных операционных усилителях [16]. Построение устройств на логических микросхемах (прежде всего, типа ТТЛ) оправдывалось их дешевизной и, главное, естественной стыковкой с другими устройствами на таких микросхемах, например, триггерами, счетчиками, регистрами и т. д. Однако, стабильность генерируемых импульсов у таких устройств была низкой, а диапазон регулировки параметров импульсов (прежде всего, частоты и амплитуды) был довольно узким.

Не особенно прижились и обычные импульсные устройства на интегральных операционных усилителях, поскольку они требовали обычно двух питающих напряжений, имели невысокое быстродействие и требовали защиты входов от перенапряжений. Сверхширокополосные интегральные усилители и компараторы, появившиеся в последнее время, лишены некоторых из этих недостатков, но они пока дефицитны и дороги. Кроме того, они имеют невысокие уровни выходного сигнала, а его увеличение проблематично и ведет к потере качества импульсных сигналов.

В связи с этим ниже мы опишем только те типы импульсных устройств, которые не только дожили до наших дней, но и перспективны в будущем, в связи с их специфическими достоинствами.

2.2.2. Импульсные генераторы на интегральном таймере

Для построения импульсных устройств умеренного быстродействия (на уровне, характерном для ТТЛ-схем), одной из лучших является специализированная микросхема аналогового *интегрального таймера* (ИТ), за рубежом называемая 555 (NE 555) [10, 11]. Интегральные таймеры вобрала в себя лучшие свойства релаксационных генераторов, построенных на обычных транзисторах.

Функциональная схема обычного интегрального таймера серии 555 показана на рис. 2.4. Выпускаются и двоянные таймеры, например, NE 556. В СССР был выпущен аналог этой микросхемы 1006ВИ1, который выпускается до сих пор и широко применяется в построении самых разнообразных импульсных устройств.

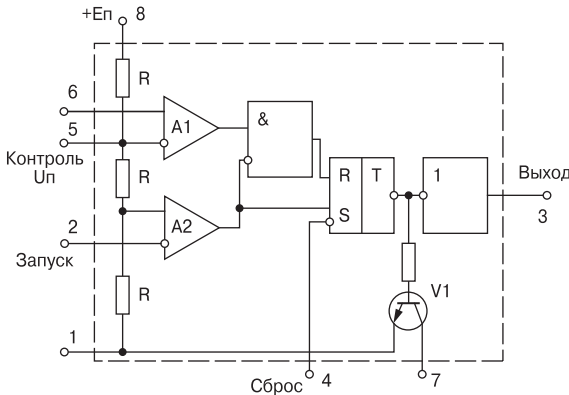


Рис. 2.4. Функциональная схема интегрального таймера

В состав интегрального таймера 555 (и половины 556) входит делитель напряжения на трех практически одинаковых резисторах R с номиналом около 5 кОм, два компаратора A1 и A2, задающих пороговые уровни включения и выключения, управляемый от них триггер, выходной каскад с ТТЛ-выходом и ключ на биполярном транзисторе V1.

Схема автоколебательного релаксатора на интегральном таймере показана на рис. 2.5, а. Конденсатор C_1 заряжается через резисторы R_1 и R_2 , и напряжение на нем растет от $U_{\text{выкл}}$ до $U_{\text{вкл}}$. Когда достигается уровень, срабатывает компаратор А1, и триггер переключается в положение, при котором открывается ключевой транзистор V1 и напряжение на выводе 7 падает практически до 0 (точнее, напряжение насыщения транзистора). В результате C_1 начинает разряжаться через резистор R_2 от уровня $U_{\text{вкл}}$ до уровня $U_{\text{выкл}}$. Но как только напряжение на нем упадет до уровня $U_{\text{выкл}}$, сработает компаратор А2 и триггер вернется в положение, при котором транзистор V1 выключается и начинается новый цикл заряда конденсатора. Процессы заряда и разряда периодически повторяются с периодом T .

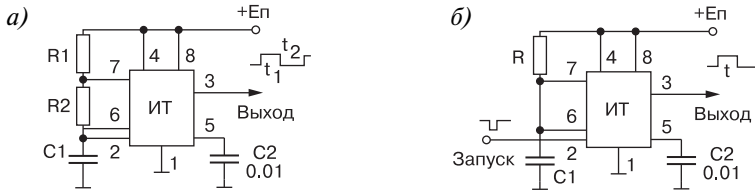


Рис. 2.5. Типовые схемы автоколебательного (а) и ждущего (б) импульсных генераторов (релаксаторов) на интегральном таймере

В релаксаторах на интегральном таймере пороговые напряжения выключения $U_{\text{выкл}}$ и включения $U_{\text{вкл}}$ задаются порогами интегральных компараторов А2 и А1 и встроенным делителем напряжения из трех одинаковых резисторов R . Сами резисторы могут иметь большой разброс и заметную температурную зависимость. Но благодаря их интегральному изготовлению и очень малым размерам, их нестабильности строго идентичны, и коэффициенты деления $1/3$ и $2/3$ оказываются очень стабильными. А это означает, что в схеме достигаются условия:

$$U_{\text{выкл}} = E_{\text{п}}/3 \quad \text{и} \quad U_{\text{вкл}} = 2E_{\text{п}}/3. \quad (2.14)$$

В этом случае с учетом выражений (2.14) для периода колебаний можно записать выражение:

$$T = t_z + t_p = C_1 (R_1 + R_2) \ln \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{выкл}}}{E_{\text{п}} - U_{\text{вкл}}} + C_1 R_2 \ln \frac{U_{\text{вкл}}}{U_{\text{выкл}}}. \quad (2.15)$$

Подставив значения $U_{\text{вкл}}$ и $U_{\text{выкл}}$ в формулу (2.15), получим:

$$T = C_1 (R_1 + R_2) \ln(2) + C_1 R_2 \ln(2) = 0.693 C_1 (R_1 + R_2) + 0.693 C_1 R_2. \quad (2.16)$$

Как нетрудно заметить из (2.16), период T принципиально не зависит от $E_{\text{п}}$, по крайней мере в пределах принятых допущений о точности сравнения напряжений компараторами. Работоспособность таймера гарантируется при изменении $E_{\text{п}}$ от 4,5 до 16 В, но на практике таймер работает даже при снижении $E_{\text{п}}$ до 2,2–5 В. Изменение T на 1 В составляет не более 0,05%, а изменение температуры на 1° С меняет период на 0,005%. Максимальный выходной ток таймера 555–200 мА, а 556–150 мА, что позволяет применять таймер для управления светодиодами и даже маломощными реле.

Возможно построение на интегральном таймере и *ждущего релаксатора* (генератора импульсов), запускаемого внешним импульсом (точнее, отрицательным перепадом на входе "Запуск"). Основная схема такого генератора представлена на рис. 2.5, б. Тут в исходном состоянии транзистор $V1$ открыт и конденсатор C_1 практически разряжен. Запускающий перепад ведет к срабатыванию триггера, в результате чего транзистор выключается, и конденсатор C_1 начинает заряжаться от напряжения $U_{\text{выкл}} \approx 0$ до напряжения $U_{\text{вкл}}$. Время его заряда и определяет длительность импульса $t_{\text{и}} = RC_1 \ln 3 = 1.1 RC_1$.

Малые входные токи компараторов позволяют использовать времязадающие резисторы с номиналами от нескольких кОм до 10 — 20 МОм, что позволяет в тысячи раз менять период колебаний или длительность импульса ждущего генератора (если это необходимо). У автоколебательного релаксатора на интегральном таймере входные токи компараторов частично компенсируются, что позволяет увеличивать R до значений даже более 20 МОм. Максимальная частота импульсов около 10 МГц, времена нарастания и спада импульсов — до 30–50 нс.

Представляет интерес рассмотрение реальных временных диаграмм работы типовых импульсных схем на интегральном таймере. На рис. 2.6 представлены осциллограммы работы интегрального таймера в схеме автоколебательного мультивибратора (рис. 1.5), а при $R_1 = 4,1$ кОм, $R_2 = 51$ кОм, $C = 1000$ пФ и $E_{\text{п}} = 5$ В. Осциллограммы получены с помощью цифрового осциллографа DS-1250 с полосой частот исследуемых сигналов до 250 МГц.

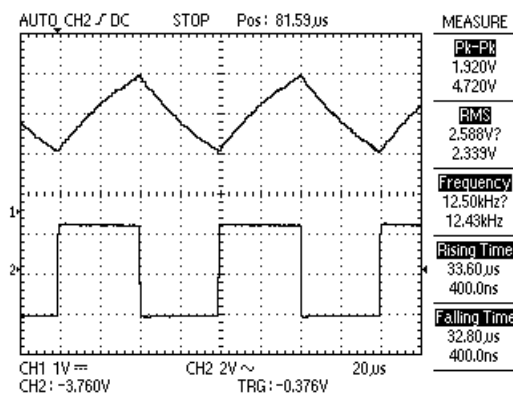


Рис. 2.6. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на выходе интегрального таймера при $C = 1000$ пФ

Нетрудно заметить, что при указанных параметрах и частоте повторения импульсов около 12 кГц форма временных зависимостей весьма близка к идеальной. Однако при уменьшении C_1 примерно до 20 пФ неидеальности временных зависимостей становятся видными (см. рис. 2.7). В частности, виден заметный выброс на вершине выходного импульса (интересно, что на выводе 7 микросхемы ИТ такого выброса нет). Минимальная длительность фронтов выходных импульсов типична для ТТЛ-микросхем и составляет до 20–30 нс.

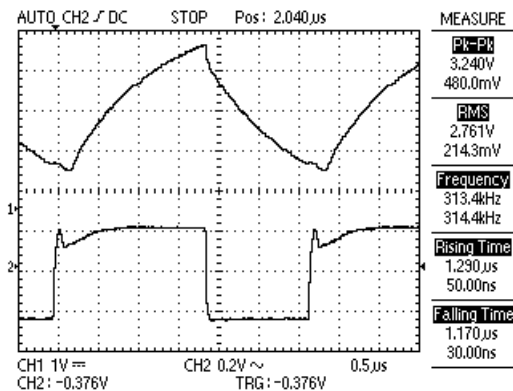


Рис. 2.7. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на выходе интегрального таймера при $C = 20 \text{ нФ}$

Уже к началу 80-х годов выпускалось более двух десятков типов интегральных таймеров. Практически все они выпускаются и в наше время. Среди них одиночные (NE 555, LM 322, XR 320) и двойные (NE 556, XR 2256) интегральные таймеры, улучшенные таймеры с уменьшенным потребляемым током и таймеры на основе технологии КМОП-транзисторов (ICM 7555, ICM 7556). Выпускаются также и программируемые таймеры (с изменяемым параметром η) и таймеры со встроенным в них счетчиком импульсов (XR 2240, ICM 8240, ICM 8250, ICM 8260 и др.).

На интегральных таймерах выполнено очень большое число (многие сотни) импульсных схем. Частично их обзор можно найти в [10, 11]. Среди описанных схем измерители сопротивления, емкости, индуктивности, частоты и других параметров. Описаны всевозможные схемы сигнализации, сенсорные устройства и т. д. Большинство описанных схем, однако, относится, скорее, к любительским, чем к профессиональным. Таймеры широко применяются в различных измерительных приборах, в промышленных и бытовых устройствах. Однако стоимость даже простых интегральных таймеров в несколько раз больше стоимости пары маломощных биполярных транзисторов, на которых строится множество "классических" импульсных устройств, например, автоколебательных и ждущих мультивибраторов.

2.2.3. Обзор импульсных устройств на негатронах

Вскоре после появления биполярных и полевых транзисторов было создано множество полупроводниковых приборов с S- и N-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ), имеющими участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением или отрицательной проводимостью. Их называют *негатронами* [20]. Негатроны принципиально и прекрасно приспособлены для построения релаксационных генераторов.

В 60-х и даже 70-х годах прошлого столетия на эти приборы возлагались большие надежды. Было показано, что при простоте схемных решений негатроны способны

выполнять любые функции электронных устройств [19-24]: линейное и нелинейное усиление и смешение сигналов, генерацию синусоидальных и импульсных сигналов, реализацию функций триггерных (двухстабильных) устройств и т. д.

Первым массовым и самым известным типом негатронов стали низковольтные *туннельные диоды*. Из-за очень низких рабочих напряжений и отсутствия управляемости их N-образной ВАХ ныне эти приборы в импульсной технике практически не применяются. Разве что, иногда они используются в высокочастотных пороговых устройствах и в некоторых уникальных (скорее, даже экзотических) разработках. К примеру, они используются в *генераторах перепадов напряжения* (от 0,2 до 0,4 В) с длительностью 50–70 пс в блоках Я4С-89 стробоскопических осциллографов С1-91/4, С1-122/4, С1-122/13 и др.

Затем были созданы приборы с S-образной ВАХ — динисторы, тиристоры и однопереходные транзисторы (ОПТ) и программируемые однопереходные транзисторы. Динисторы и тиристоры, в основном, выпускаются как мощные приборы и широко используются в современных энергетических устройствах для преобразования электрической энергии, хотя и испытывают сильную конкуренцию со стороны мощных биполярных и полевых транзисторов и приборов IGBT (биполярные транзисторы с полевым управлением). Импульсные устройства общего назначения на динисторах и тиристорах, хотя и были созданы, широкого применения не получили прежде всего из-за низкого быстродействия (частоты редко доходят до десятков кГц) и малой области токов, в пределах которой формируется падающий участок S-образной ВАХ.

В импульсных устройствах широкого назначения больше повезло *однопереходным транзисторам* и их *транзисторным аналогам* [22-24, 71]. На основе последних были разработаны и программируемые однопереходные транзисторы (название неточное, поскольку реально в структуре таких приборов три p-n-перехода). Имея на порядок более высокое быстродействие, чем тиристоры, и более широкий диапазон токов в области падающего участка S-образной ВАХ, эти приборы заняли прочные позиции на рынке простых релаксационных устройств. Лямбда-диоды и лямбда-транзисторы и их аналоги также показали себя достаточно интересными и полезными приборами, но из стадии экзотических применений так и не вышли.

Весьма интересна и поучительна судьба поистине уникальных приборов — *лавинных транзисторов* [25-69, 72, 73]. Эти приборы не только сочетают возможности обычных транзисторов с возможностями негатронов с S- и N-образными управляемыми ВАХ, но и теоретически и даже практически сочетают предельно большие рабочие напряжения и токи с предельно малым временем включения. Применение лавинных транзисторов нередко позволяет резко упростить импульсные схемы и получить от них уникальные параметры импульсов.

На самом деле структура специальных лавинных транзисторов ничем не отличается от структуры обычных биполярных транзисторов. Просто при работе таких приборов используется умножение носителей в коллекторном переходе при больших напряжениях на нем. На протяжении уже десятков лет лавинные транзисторы применяются для построения импульсных устройств высокого быстродействия и с большими им-

пульсными токами и напряжениями. Особенности этих приборов мы рассмотрим ниже отдельно в связи с заметным возрастанием интереса к этим приборам в последние годы. Но вначале кратко опишем схемы на однопереходных транзисторах.

2.2.4. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах

Основная схема автоколебательного релаксационного генератора на ОПТ представлена на рис. 2.8. Величину резистора R берут такой, чтобы рабочая точка ОПТ располагалась на падающем участке S-образной входной ВАХ. При ее работе конденсатор C периодически заряжается через резистор R от напряжения впадины ВАХ U_B (вначале от 0) до напряжения пика ВАХ $U_{II} = \eta U_{66} + U_3(I_{II})$, а затем разряжается до этого уровня до U_B . На рис. 2.8 показаны три варианта включения дополнительных резисторов для сьема с них коротких импульсов (обычно используется один или два варианта).

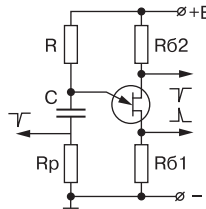


Рис. 2.8. Автоколебательный генератор (релаксатор) на ОПТ

Времена заряда и разряда C при отсутствии дополнительных резисторов равны:

$$t_3 = RC \ln \frac{E - U_B}{E - U_{II}} \quad \text{и} \quad t_p = CR_{\text{вкл}} \ln \frac{U_{II}}{U_B}. \quad (2.17)$$

Сопротивление ОПТ во включенном состоянии $R_{\text{вкл}} \ll R$, поэтому период колебаний при $U_{\text{выкл}} \ll E$ и $R_{62} \ll R_{66}$:

$$T = t_3 + t_p \cong t_3 = RC \ln \frac{E - U_B}{E - U_{II}} \cong RC \ln \frac{1}{1 - \eta}. \quad (2.18)$$

Итак, при ряде сделанных допущений период колебаний (2.18) не зависит от напряжения питания E . Однако, поскольку эти допущения соблюдаются лишь приблизительно, то некоторая слабая зависимость T от E все же имеет место. Тем не менее, релаксатор (рис. 2.8) относится к числу высокостабильных (по частоте) импульсных схем. Для получения высокой стабильности желательно задавать $E > 10$ В.

Осциллограммы импульсов на базе 2 при $C = 1000$ пФ, $R = 51$ кОм, $R_{62} = 2$ кОм, $R_{61} = R_p = 0$ и на конденсаторе C представлены на рис. 2.9. Частота повторения импульсов при этом близка к 20 кГц и может плавно меняться в десятки раз при применении переменного резистора R .

Напряжение на конденсаторе C имеет классический для релаксатора вид — экспоненциальное медленное нарастание при заряде конденсатора C и затем быстрый спад

при его разряде. Таким образом генерируются импульсы с высокой скважностью — отношением t_p/t_3 . Однако короткие импульсы на резисторе R_{62} имеют довольно большие времена нарастания и спада из-за невысокого быстродействия ОПТ при его включении и выключении. Их конкретные значения равны примерно 1,6 и 1 мкс. В связи с этим схема (рис. 2.8) пригодна лишь в качестве генератора коротких запускающих импульсов отрицательной полярности. Для получения импульсов положительной полярности можно включить резистор небольшой величины (сотни Ом) в цепь базы 1.

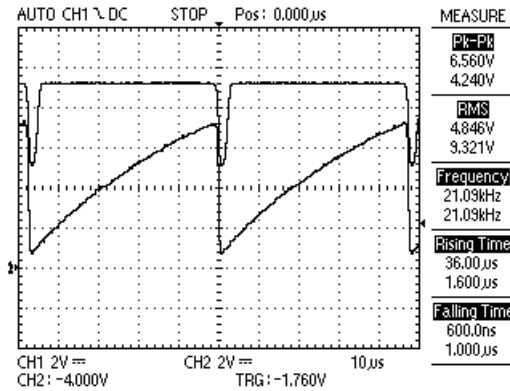


Рис. 2.9. Осциллограммы импульсов на базе 2 (сверху) и на конденсаторе С

На однопереходных транзисторах было построено множество схем генераторов прямоугольных импульсов (мультивибраторов), генераторов треугольных и пилообразных импульсов и т. д. [71]. Для примера на рис. 2.10 показана простая схема генератора пилообразного напряжения на ОПТ. Ее отличительная особенность — применение для стабилизации зарядного тока интегрального стабилизатора тока на основе сравнительно новой микросхемы КЖ101А.

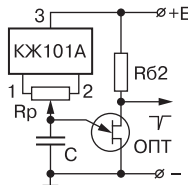


Рис. 2.10. Схема автоколебательного генератора пилообразного напряжения на ОПТ и микросхеме стабилизатора тока КЖ101А

Микросхема включена так, что позволяет регулировать ток заряда конденсатора С, делая его как меньшим, так и большим начального тока микросхемы. Осциллограммы импульсов напряжения на эмиттере (конденсаторе С) и на базе 2 ОПТ представлены на рис. 2.11. Форма напряжения на конденсаторе С выглядит близкой к идеальной, но стоит заметить, что получение нелинейности менее 1% у такой простой схемы все же затруднительно. Иногда для повышения линейности и нагрузочной способности по-

добных генераторов применяют буферные эмиттерные повторители на одном обычном или составном биполярном транзисторе.

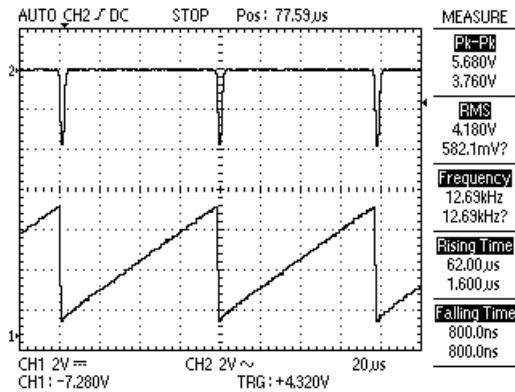


Рис. 2.11. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на базе 1 ОПТ в схеме генератора пилообразного напряжения рис. 2.10

2.2.5. Особенности лавинных транзисторов

В 70-х годах XX века широкую известность получили лавинные транзисторы — приборы уникальные по физическим свойствам и рекордно высокому быстродействию импульсных схем на них, которое (что встречается очень редко) у таких устройств сочетается с высокими уровнями рабочих напряжений и токов. Кроме того, биполярные лавинные транзисторы имеют легко управляемые как S-образные, так и N-образные ВАХ (рис. 2.12) [21, 26, 30, 73]. Вполне возможно оптическое управление всеми этими ВАХ путем освещения структуры лавинных транзисторов.

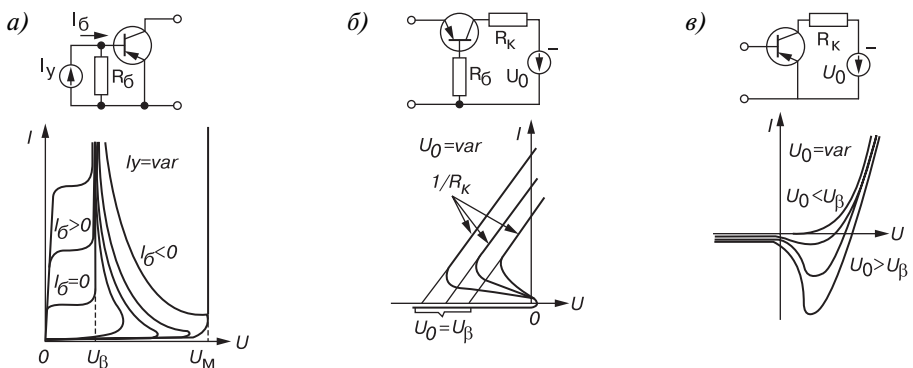


Рис. 2.12. Схемы включения лавинного транзистора и соответствующие им семейства ВАХ:

- а — со стороны коллектора,
- б — со стороны эмиттера и
- в — со стороны базы

Падающие участки ВАХ (рис. 2.12) были давно обнаружены еще у точечных транзисторов и были связаны были с присущей таким транзисторам внутренней положительной обратной связью в условиях, когда коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha > 1$. Однако у точечных транзисторов этот механизм был очень инерционный.

У лавинных транзисторов ВАХ с падающими участками возникают вследствие увеличения биполярного транзистора α в M раз, происходящего вследствие лавинного умножения носителей в коллекторном переходе при достаточно большом напряжении U на нем. Сам по себе механизм лавинного умножения практически безынерционный.

Для расчета M может использоваться выражение, известное, как формула Миллера:

$$M = \frac{I(U)}{I_0} = \frac{1}{1 - (U/U_M)^n}, \quad (2.19)$$

где $n=6$ для n^+-p и $n=3$ для германиевых p^+-n -переходов, и $n=2$ и $3,5$ для кремниевых переходов n^+-p и p^+-n . Из этого выражения вытекает, что M чуть больше 1 при малых U , но $M \rightarrow \infty$ при напряжении U , стремящемся к *напряжению лавинного пробоя коллекторного перехода* U_M .

Заметим, что работа в условиях развитого лавинного пробоя (при очень больших M) характерна для таких давно известных и массовых приборов, как кремниевые стабилитроны. Это одни из самых надежных приборов. Уже одно это опровергает предположения о низкой надежности транзисторов в лавинном режиме работы. Тем более в связи с тем, что для работы лавинных транзисторов развитый лавинный пробой не характерен и значения M вполне конечны.

Из условия $\alpha M = 1$, при M , заданном выражением (2.19), можно найти нижнюю границу напряжения, характерного для работы транзистора в лавинном режиме. Это *напряжение пробоя при обрыве базы*:

$$U_\beta = U_M \sqrt[n]{1 - \alpha}. \quad (2.20)$$

Это напряжение обычно составляет (в зависимости от α) от 0,2 до 0,5 от U_M . Таким образом, при

$$U_\beta < U < U_M \quad (2.21)$$

транзистор имеет значения $\alpha M > 1$ и ведет себя формально, как точечный транзистор, имеющий $\alpha > 1$ и вольт-амперные характеристики, показанные на рис. 2.12.

Однако, поведение биполярного транзистора в лавинном режиме, при построении на его основе релаксационных схем, резко отличается от поведения точечного транзистора, да и того же биполярного транзистора в обычном режиме. Необычность заключается в резком повышении скорости включения транзистора порою в сотни и тысячи раз в области больших напряжений и токов. Именно это и открывает возможность генерации коротких импульсов с временами нарастания до 1 нс и менее с помощью очень простых релаксационных схем. При этом важно, чтобы средняя мощность рассеивания транзистора не превышала допустимую. Если этого не предусмотреть, то выход транзистора из строя может произойти в доли секунды из-за возникновения теплового пробоя.

Причины аномально высокого быстродействия транзисторов (особенно кремниевых $n-p-n-p^+$ планарно-эпитаксиальных) в лавинном режиме кроются во впервые обнаруженном и объясненном в книге [21] и в серии статей [31-38] *эффекте расширения области объемного заряда* (ООЗ) коллекторного перехода при росте коллекторного тока вглубь базы — вплоть до динамического смыкания с эмиттером. Этот эффект происходит при больших токах коллектора и коэффициенте лавинного умножения M , превышающем некоторое вполне умеренное критическое значение $M_{кр}$. При этом заряд вторичных носителей превышает заряд первичных носителей, и ООЗ коллектора расширяется, а не сужается, как в обычном режиме работы транзистора (последний эффект назван эффектом Кирка и снижает быстродействие транзисторов в области больших токов [89]).

Использующие этот эффект транзисторы были названы *лавинными транзисторами с ограниченной областью объемного заряда* — ЛТОООЗ. К таким транзисторам относятся серийные советские германиевые $p-n-p-p^+$ специальные лавинные транзисторы серии ГТ338, зарубежные кремниевые лавинные транзисторы фирмы Zetex и большинство кремниевых $n-p-n-p^+$ обычных транзисторов, используемых в лавинном режиме [73].

2.2.6. Емкостной релаксатор на лавинном транзисторе

Для изучения поведения транзисторов в лавинном режиме можно использовать установку, функциональная схема которой показана на рис. 2.13 [90].

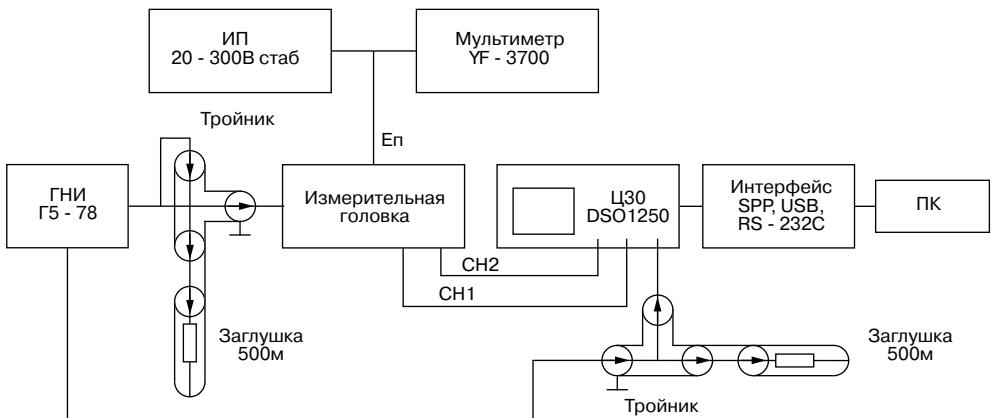


Рис. 2.13. Функциональная схема установки для измерения параметров импульсов, формируемых емкостным релаксатором на лавинном транзисторе

Емкостной релаксатор на лавинном транзисторе смонтирован в измерительной головке (рис. 2.14), которая крепится прямо на входном разьеме цифрового осциллографа. Это уменьшает искажения импульса разрядного тока, который формируется при запуске релаксатора. Второй вход осциллографа используется для получения совме-

щенной осциллограммы напряжения на коллекторе лавинного транзистора. Для легкой замены лавинного транзистора он крепится на панельке. Рекомендуется обрезать выводы транзистора до длины не более 1 см (это достаточно для установки транзистора в панельку).

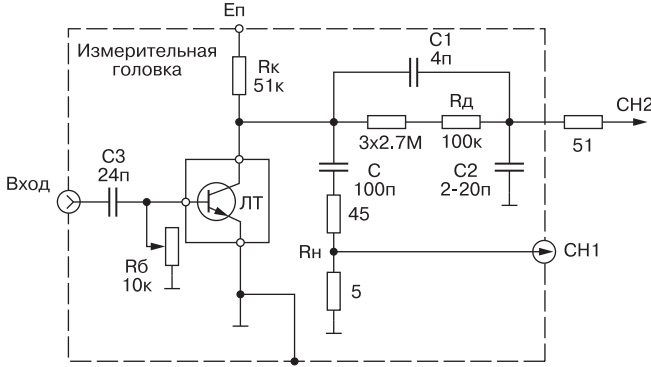


Рис. 2.14. Измерительная головка с емкостным релаксатором на лавинном транзисторе

Измерительная головка является типичным емкостным релаксатором. В нем конденсатор C заряжается через резистор R_k до напряжения, близкого к U_M . При запуске лавинный транзистор ЛТ включается и конденсатор C разряжается через него, и сопротивление нагрузки R_n . Так релаксатор работает в ждущем режиме. Увеличением напряжения питания E_n можно добиться перевода релаксатора в автоколебательный режим работы. Переменный резистор R_6 позволяет задать сопротивление между базой и эмиттером, необходимое для получения S-образной ВАХ со стороны коллектора.

На рис. 2.15 показаны осциллограмма импульса напряжения на нагрузочном (разрядном) резисторе и осциллограмма спада напряжения на коллекторе транзистора. Осциллограммы приведены для кремниевого планарно-эпитаксиального транзистора 2Т312В, который хорошо показал себя в роли лавинного транзистора с напряжением лавинного пробоя коллекторного перехода около 120 В. Среди серийных отечественных и зарубежных транзисторов есть приборы с напряжением лавинного пробоя коллекторного перехода U_M от 25 до 500 В.

Здесь можно отметить 4 характерные стадии работы релаксатора:

1. Стадия *регенеративного включения лавинного транзистора*, при больших токах коллектора ведущая к смыканию областей объемного заряда переходов транзистора и резкому уменьшению времени пролета носителей через базовую область. Иногда этой стадии предшествует стадия медленного роста коллекторного тока до критического значения, при котором ООЗ коллекторного перехода достигает эмиттерного перехода.
2. *Разряд конденсатора C* при напряжении на коллекторе, близком к U_B , который сопровождается накоплением в структуре лавинного транзистора избыточных зарядов.

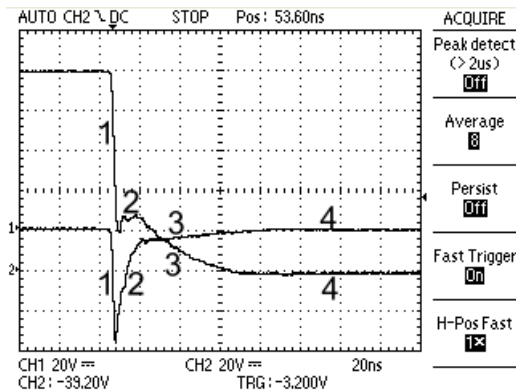


Рис. 2.15. Осциллограммы импульсов разрядного тока и напряжения на коллекторе лавинного транзистора 2Т312В

3. Вход транзистора в *динамическое насыщение*, при котором происходит дальнейший разряд C вплоть до 0 и формируется полочка с близким к 0 напряжением на коллекторе.
4. *Выход транзистора из состояния насыщения* и начало медленного заряда конденсатора C через резистор R_k .

2.2.7. Генератор прямоугольных импульсов на лавинном транзисторе с накопительной линией

Заменяв конденсатор C отрезком коаксиального кабеля или полосковой линией, можно получить разрядный импульс почти прямоугольной формы. При этом важно, чтобы общее сопротивление разряда (R_n плюс малое, порядка единиц Ом, сопротивление включенного лавинного транзистора) было равно волновому сопротивлению линии. Длительность импульса равна двойному времени задержки линии.

Основанный на этом простой генератор прямоугольных наносекундных импульсов на основе *релаксатора с накопительной линией* показан на рис. 2.16, а. В генераторе применен высоковольтный транзистор КТ630А с U_M около 300 В и отрезок коаксиального 75-омного коаксиального кабеля с длиной около 1,5 м.

На рис. 2.16, б представлена осциллограмма формируемого импульса. Нетрудно заметить, что форма импульса при столь малой длительности (15 нс) очень хорошая, а амплитуда импульса на нагрузке 50 Ом достигает 100 В. Получить такие импульсы от обычных и куда более сложных схемных решений довольно трудно, а подчас и просто невозможно. Конденсатор C_k небольшой емкости служит для коррекции фронта импульса — он уменьшает выбросы выходного импульса.

При использовании в схеме рис. 2.16, а менее высоковольтных транзисторов КТ831А и КТ1102Л можно получить амплитуду импульса при той же форме, соответственно

около 70 и 30 В. Расчет подобных схем и ряд других схем генераторов прямоугольных импульсов на лавинных транзисторах можно найти в [21, 73].

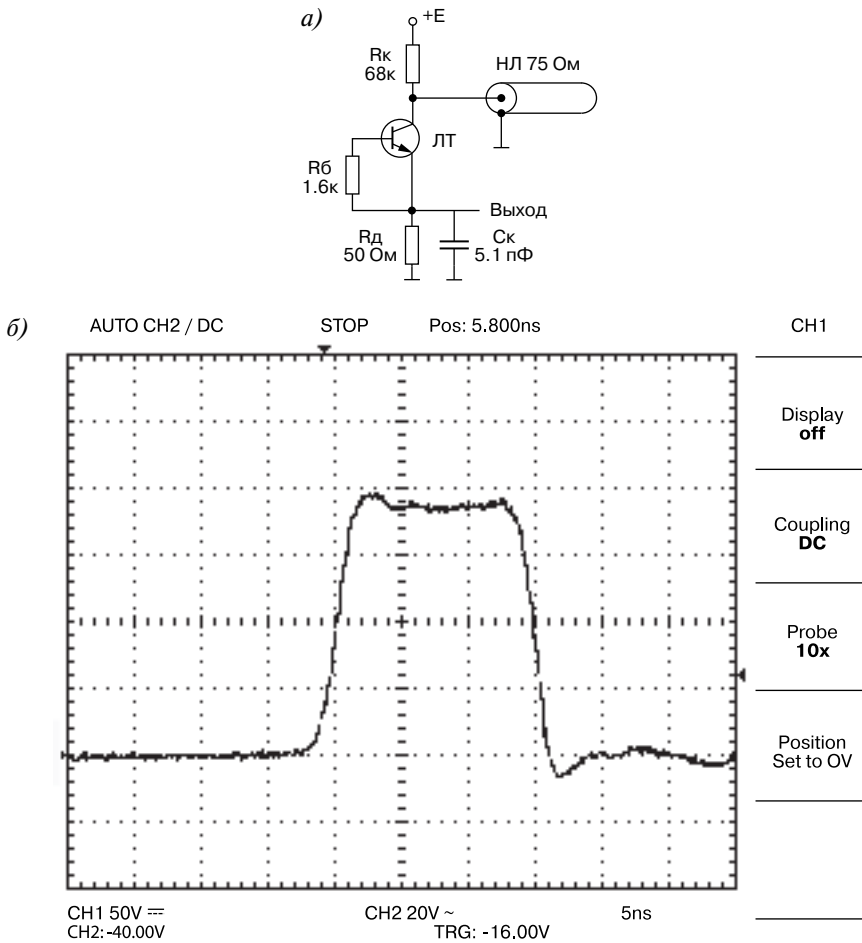


Рис. 2.16. Генератор прямоугольных импульсов на лавинном транзисторе КТ630А с накопительной линией в виде отрезка коаксиального кабеля (а) и осциллограмма выходного импульса при $E_n = 300 \text{ В}$ (б)

2.2.8. Генератор наносекундных импульсов тока в 25 А на лавинном транзисторе

ЛТОООЗ (и обычные кремниевые n-p-n транзисторы, работающие в лавинном режиме с ограниченной ООЗ) позволяют получить уникальные параметры импульсов, недостижимые при использовании других полупроводниковых приборов. Примером

может служить схема генератора импульсов с амплитудой около 25 А при длительности импульса около 1,5 нс [72]. Она показана на рис. 2.17, а. Генератор предназначен для запуска мощных скоростных лазерных диодов, используемых, например, в лазерных локаторах и дальномерах.

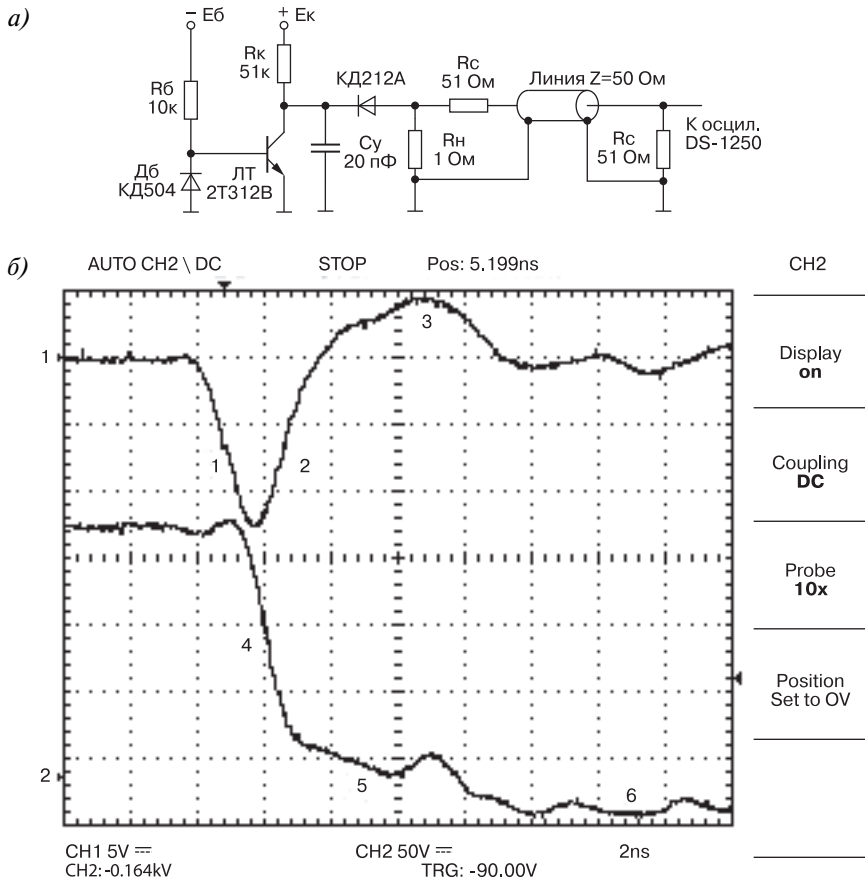


Рис. 2.17. Схема генератора мощных наносекундных импульсов на лавинном транзисторе (а) и осциллограммы импульсов напряжения на нагрузке и коллекторе лавинного транзистора при масштабе по горизонтали 2 нс/дел (б)

Это типичная релаксационная схема. Для увеличения начального напряжения на конденсаторе релаксатора до напряжения лавинного пробоя коллекторного перехода U_M желательно надежно запереть транзистор вплоть до наступления пробоя. Для этого в схему релаксатора введем резистор $R_B = 10$ кОм, подключенный к источнику напряжения E_6 отрицательной полярности. При этом потенциал базы фиксируется диодом D_6 , что предотвращает пробой эмиттерного перехода.

Моделирование на ЭВМ и эксперимент показывают, что даже малая паразитная индуктивность разрядного контура (в единицы нГн) вызывает сильный колебательный процесс после разрядного импульса. Было установлено, что эффективным способом борьбы с ней является применение нелинейного накопительного конденсатора, емкость которого увеличивается по мере его разряда. Подходящим в этой роли является силовой диод КД212А, который имеет рабочее напряжение 200 В (больше U_M), и емкость около 45 пФ при напряжении 100 В. Она возрастает в несколько раз при уменьшении напряжения до 0. Кроме того, этот диод имеет очень малое паразитное последовательное сопротивление.

Чтобы исключить отражение в кабеле осциллографа введем согласующие резисторы R_c по 51 Ом в начале и в конце кабеля, подключающего осциллограф к нагрузке R_n . Это означает возникновение делителя напряжения в 2 раза. В качестве эквивалента нагрузки возьмем практически безындуктивный резистор МЛТ-0,25 с номиналом 1 Ом.

На рис. 2.17, б показаны осциллограммы импульсов на нагрузке $R_n=1$ Ом и на коллекторе транзистора, снятые 250 МГц цифровым осциллографом DS-1250 фирмы EZ Digital. Амплитуда импульса достигает (с учетом деления напряжения в 2 раза) 25 В, т. е. пиковый ток в нагрузке имеет значение 25 А, вполне соответствующее нашим прикидкам. При смене транзистора амплитуда тока может меняться примерно от 20 до 30 А при практически аналогичных временных параметрах.

Импульс разрядного тока имеет почти равные по длительности участки нарастания 1 и спада 2 тока и характерный выброс после них — 3. Минимизировать этот выброс можно, предельно сократив длину разрядной цепи. Полное устранение выброса, как правило, нецелесообразно, поскольку он способствует рассасыванию избыточных зарядов в реальной нагрузке — лазерном диоде и уменьшению длительности спада светового импульса.

Частота автоколебаний генератора около 200 кГц. Уменьшив E_k или увеличив E_b , можно перевести генератор в ждущий режим и запускать импульсами положительной полярности, подаваемыми на базу транзистора через разделительный резистор в сотни Ом. Если E_k немного превышает U_M , то форма импульсов получается аналогичной описанной. При меньших E_k амплитуда импульсов быстро падает.

Применение этих транзисторов позволяет в простых релаксационных схемах получать наносекундные импульсы с амплитудой до 50–60 А от одного лавинного транзистора или многие сотни В и сотни А при их последовательном и параллельном включении, либо при использовании в схеме Маркса. Необходимость в получении таких импульсов появилась в связи с созданием новых типов измерительных приборов — лазерных локаторов и дальномеров, видеолокаторов и георадаров.

В наши дни параметры подобных генераторов можно существенно улучшить, применяя специально разработанные зарубежные высоковольтные кремниевые ЛТОООЗ. Серию таких приборов разработала в середине 90-х годов крупная полупроводниковая фирма Zetex Semiconductors. Приборы FMMT413, FMMT415, ZTX415 и FMMT417 имеют напряжение $U_M=U_{CB0}=150, 260, 260$ и 320 В и пиковые токи разряда конденсатора 50 и 60 А [73]. Транзисторы выполнены в сверхминиатюрном корпусе

SOT23 для плотного поверхностного монтажа на печатные платы. Длина выводов у них минимизирована, что уменьшает их паразитную индуктивность и уменьшает возниновение колебаний при разряде C . Несмотря на уникально большие импульсные токи, средняя рассеиваемая мощность приборов составляет всего 0,33 или 0,68 Вт, т. е. приборы относятся к классу маломощных транзисторов.

2.3. Серийные генераторы импульсов

2.3.1. Обзор рынка серийных генераторов импульсов

Наряду с генераторами синусоидальных сигналов для отладки и тестирования электронной аппаратуры широко применяются источники импульсных сигналов. Множество их выпускается промышленностью в виде *импульсных генераторов*. Эти устройства перекрывают огромный диапазон длительностей импульсных сигналов — от долей наносекунды до многих суток. Мы рассмотрим два класса таких устройств: генераторы импульсов микросекундной (и большей) длительности и наносекундной (и меньшей) длительности.

С появлением *функциональных генераторов* (см. главу 3), генерирующих как симметричные, так и несимметричные прямоугольные и треугольные импульсы в широком диапазоне изменения частот и длительностей, потребность в импульсных генераторах другого типа заметно упала. Многие серийные генераторы импульсов имеют чрезмерно высокие характеристики, а потому дороги, громоздки и тяжелы. А современная микроэлектронная база позволяет на одной-двух микросхемах и нескольких дополнительных элементах создавать множество дешевых импульсных устройств, встраиваемых в современные измерительные приборы: калибраторов, мультиметров и осциллографов, генераторов тестовых сигналов для проверки логических устройств, генераторов для запуска исследуемых импульсных устройств и т. д.

В связи с этим выпуск импульсных генераторов (особенно за рубежом) резко сократился. Для нас это было особенно характерно в 90-е годы распада СССР и глубокого кризиса в разработке и производстве радиоизмерительных приборов. Зато из-за низкого спроса на приборы у нас пополнились складские запасы нераспроданных приборов.

Ниже дано краткое аннотационное описание нескольких типовых моделей отечественных импульсных генераторов. Подробное описание их и условия поставки можно найти на интернет-сайтах ряда организаций [126-129].

2.3.2. Типовая функциональная схема аналогового импульсного генератора

Недостатком простейших импульсных устройств, рассмотренных выше, является трудность отдельной регулировки их параметров (частоты и длительности импуль-

сов, временной задержки, амплитуды и т. д.). В связи с этим промышленные измерительные генераторы импульсов строятся, как правило, на основе функциональных блоков, оптимизированных на те или иные функции. Например, задающий генератор проектируется как устройство формирования импульсов с частотой, регулируемой в заданных пределах, блок временной задержки служит для создания заданной временной задержки, блок формирования длительности импульсов задает импульс заданной длительности, блок формирования амплитуды создает импульс заданной амплитуды с заданным смещением.

На рис. 2.18 показана *функциональная схема* промышленного генератора прямоугольных импульсов нано- и микросекундного диапазонов длительности, реализующего приведенный выше принцип построения генераторов.

Подобная функциональная схема характерна для первого поколения аналоговых генераторов импульсов. Современные генераторы с цифровым синтезом частот повторения и форм импульсов строятся по совершенно иным принципам и функциональным схемам. Они частично рассмотрены в главе 1 и более подробно будут описаны в главе 4.

2.3.3. Отечественные серийные генераторы микросекундных импульсов

Во времена СССР была создана обширная номенклатура импульсных генераторов общего назначения — серия Г5. Рассмотрим некоторые из моделей таких генераторов микросекундного диапазона длительностей и временных задержек.

Г5-54

Простой и сравнительно недорогой малогабаритный и довольно легкий универсальный генератор прямоугольных импульсов. Прибор был разработан в 70-х годах и продается до сих пор. Частота повторения импульсов 0,01–100 кГц, длительность 0,1–1000 мкс, амплитуда 15 мВ — 50 В, габариты 370×227×185 мм, масса 6 кг. Внешний вид генератора показан на рис. 2.19. Для плавной регулировки параметров импульсов используются поворотные ручки с большими шкалами.

Г5-63

Генератор двойных импульсов. Внешне напоминает Г5-54. Период повторения импульсов основных 10 мкс — 200 мс, двойных 50 мкс — 200 мс, длительность 0,1–1000 мкс, амплитуда 6 мВ — 60 В, габариты 380×258×187 мм, масса 7,6 кг.

Г5-67

Высокочастотный генератор импульсов. Частота повторения импульсов 1 кГц — 50 МГц, длительность 10 нс — 300 мкс, амплитуда 5 В, габариты 486×132×475 мм, масса 15 кг. По характеристикам прибор вплотную примыкает к генераторам наносекундных импульсов.

Г5-72

Универсальный импульсный генератор с широким диапазоном длительностей импульсов и с удобным кнопочным управлением (рис. 2.20). Диапазон длительностей

импульсов от 20 нс до 1 с, амплитуда 0,025 В — 10 В, длительность фронта до 2 нс, габариты 335×200×354 мм, масса 7,5 кг.

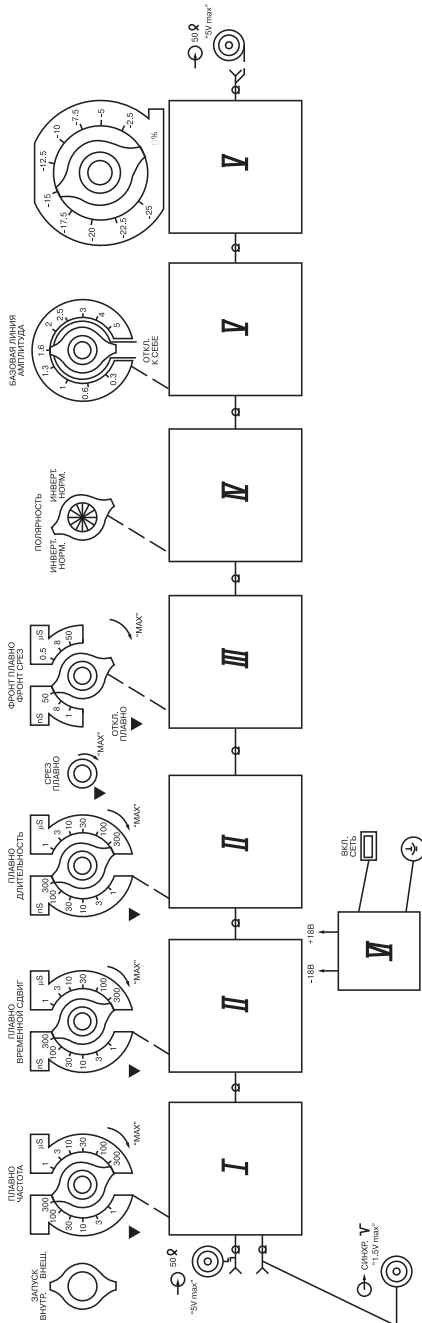


Рис. 2.18. Функциональная схема генератора импульсов Г5-78. Блоки генератора выполняют следующие функции: I — устройство внешнего запуска и задающий генератор, II — устройства формирования временного сдвига и длительности (грубо и плавно), III — устройство формирования фронта/спада и заданной длительности (грубо и плавно), IV — устройство выходное универсальное, V — делитель (аттенюатор) выходного сигнала и VI — блок питания.



Рис. 2.19. Внешний вид генератора импульсов Г5-54



Рис. 2.20. Генератор импульсов универсальный Г5-72

Г5-88

Малогабаритный и довольно легкий генератор импульсов. Период повторения импульсов 1 мкс — 1 с, длительность 0,1 мкс — 1 с, амплитуда 0,006 — 100 В, габариты 327×132×260 мм, масса 4,5 кг. Малые вес и габариты, большая амплитуда импульсов (до 100 В), безусловно, являются достоинством этого генератора.

Г5-84

Этот прибор предназначен для формирования импульсов обеих полярностей с широким диапазоном измерения всех основных параметров. Период повторения 1 мкс — 999 мс, длительность импульсов 1 нс — 999 мкс, длительность фронта 70 пс, среза 200 пс, амплитуда импульсов 5–9 В, предел основной погрешности $\pm 10\%$, габариты 480×160×475 мм, масса 18 кг.

Нетрудно заметить, что электрические параметры промышленных генераторов импульсов достаточно высоки, но практически все приборы имеют большие вес и габариты. Все они относятся к стационарным и отнюдь не дешевым приборам. Поэтому как специалисты, так и радиолюбители, нередко собирают импульсные генераторы специального назначения самостоятельно.

2.3.4. Отечественные серийные генераторы наносекундных импульсов

К генераторы импульсов наносекундного диапазона относятся генераторы с временами нарастания и спада импульсов порядка 1 нс и менее, а минимальная длительность импульсов меньше 10 нс. Разумеется, эти границы достаточно условны, и эти генераторы отечественного производства также относятся к классу приборов Г5.

Г5-44

Один из первых советских генераторов наносекундных импульсов. Генерирует импульсы с длительностью от 1 до 50 нс, временем нарастания 0,8 нс, временем спада 1 нс и амплитудой 5–7,5 В на нагрузке 75 Ом. Частота повторения импульсов при внутреннем запуске от 0,1 до 120 МГц. Это громоздкий и тяжелый прибор: его габариты 480×320×475 мм, масса 40 кг.

Г4-45

Это двухканальная система, состоящая из генератора Г5-44 и устройства временного сдвига от 0 до 150 нс с шагом 5 нс. Устройство сдвига имеет габариты 300×120×270 мм. Общая масса генератора 92,5 кг!

Г5-47

Генерирует импульсы с длительностью от 3 до 100 нс, временем нарастания и спада 1 нс и амплитудой 50 В на нагрузке 75 Ом. Частота повторения импульсов при внутреннем запуске от 0,02 до 200 кГц. Габариты 490×215×475 мм, масса 19 кг. Один из немногих генераторов, имеющих большую амплитуду формируемых импульсов, но при довольно низких частотах повторения.

Г5-48

Генерирует импульсы с длительностью от 6 нс до 25 мкс с временами нарастания и спада не более 1 нс и частотой при внутреннем запуске от 1 кГц до 20 МГц. Амплитуда импульсов 10 В на нагрузке 75 Ом. Габариты прибора 480×160×355 мм, масса 15 кг.

Г5-59

Генерирует импульсы с длительностью от 2 нс до 300 мкс с временами нарастания и спада не более 2 нс и частотой при внутреннем запуске от 1 кГц до 200 МГц. Амплитуда импульсов до 0,05–5 В на нагрузке 50 Ом. Габариты прибора 480×120×475 мм, масса 15 кг.

Г5-62

Генератор кодовых комбинаций импульсов: длина кодовой комбинации 32 бита, число кодовых комбинаций в пакете и пауза между пакетами 1–99, длительность 3–3000 нс, временной сдвиг 0–20 нс, тактовая частота 0,3–120 МГц, амплитуда 1,5–5 В, габариты 486×185×570 мм, масса 26 кг. Этот громоздкий и тяжелый прибор в наше время сильно устарел. Он заменяется новым поколением генераторов сигналов произвольной формы, которые описаны в главе 3.

Г5-78

Типичным представителем второго поколения генераторов наносекундных импульсов (на транзисторах и заказных гибридно-пленочных микросхемах) является генератор Г5-78 (рис. 2.21). Его функциональная схема уже была описана (см. рис. 2.18). Прибор выполнен полностью на транзисторах и заказных специализированных гибридно-пленочных интегральных микросхемах в герметичных запаянных корпусах. В них используются бескорпусные транзисторы. Межблочные соединения выполнены согласованными отрезками коаксиального кабеля.

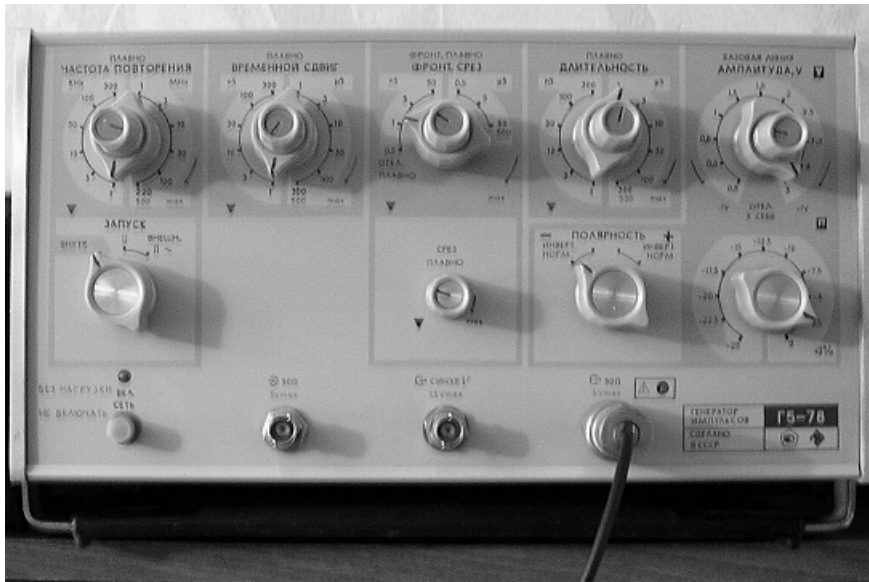


Рис. 2.21. Генератор импульсов Г5-78

Г5-78 предназначен для генерирования одинарной последовательности основных импульсов положительной и отрицательной, нормальной и инвертированной полярности. Применяется для разработки, проверки и обслуживания быстродействующих радиоэлектронных устройств, интегральных схем, цифровых линий передачи данных с импульсно-кодовой модуляцией.

Основные технические характеристики генератора импульсов Г5-78:

- Частота повторения импульсов в автоколебательном режиме работы 1 кГц — 500 МГц.
- Амплитуда основных импульсов 0,5 — 5 В, полярность любая.
- Смещение базовой линии -1 ... + 1 В.
- Длительность импульсов 1 нс — 500 мкс.
- Временной сдвиг основного импульса относительно синхроимпульса 1 нс — 500 мкс.

- Минимальная длительность фронта, среза не более 0,5 нс.
- Регулируемая длительность фронта, среза 1 нс — 500 мкс.
- Габариты прибора 304×120×300 мм, масса 9 кг.

Этот прибор полностью заменяет устаревший генератор импульсов Г5-59, значительно превосходит его по ряду показателей (частота повторения, минимальные длительности импульса, фронта и среза). В сущности Г5-78 — это универсальный генератор импульсов с очень широким частотным диапазоном и минимальной длительностью импульсов и их фронтов в 1 нс. Частота повторения импульсов 1 кГц — 500 МГц (при внешнем запуске диапазон частот снизу не ограничен) и другие параметры импульсов генератора позволяют применять его для исследования, тестирования и отладки весьма большого числа электронных импульсных, измерительных и связных устройств.

При использовании подобных генераторов очень важно соблюдать все правила измерений в области малых времен и высоких частот: подключение генератора и осциллографа только через коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 50 Ом, тщательное согласование кабелей на входе и на выходе, предельное укорочение длины соединительных проводников и выводов компонентов и снижение входной емкости осциллографа. Заметим, что даже при 50-омном согласовании емкость в 20 пФ дает постоянную времени входной цепи в 1 нс и время нарастания импульсов не менее 2,2 нс. Так что только при указанных мерах можно реализовать получение хорошей формы импульсов и наблюдения их времен нарастания (около 1–2 нс) без заметных выбросов и колебаний (см. рис. 2.22).

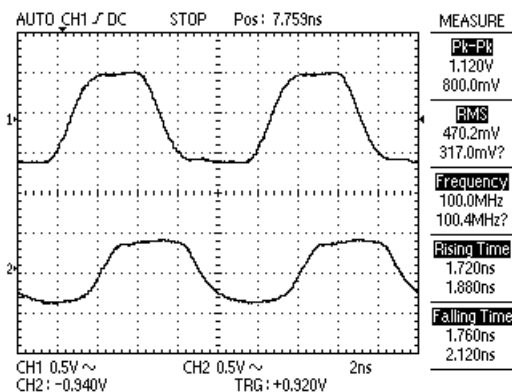


Рис. 2.22. Импульсы на основном выходе и выходе синхронизации генератора Г5-78 на частоте 100 МГц (сняты с помощью цифрового осциллографа DS-1250 с полосой частот до 250 МГц)

Замечательной особенностью этого генератора является возможность плавной регулировки времени нарастания и спада импульсов, а также временной задержки относительно импульсов синхронизации. На рис. 2.23 показана осциллограмма выходного трапецеидального импульса генератора Г5-78 при длительностях фронта и среза им-

пульса, равных 10 нс. Увеличение длительности фронта и среза импульсов позволяет заметно уменьшить выбросы, а также генерировать импульсы пилообразной формы.

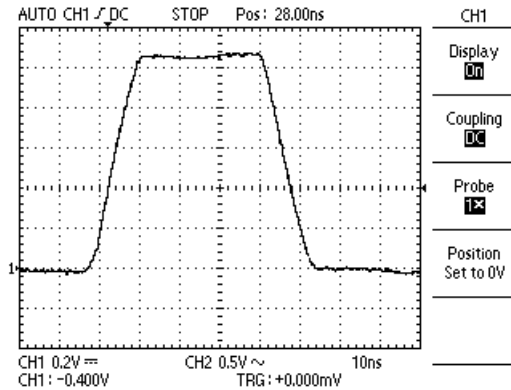


Рис. 2.23. Импульс генератора Г5-78 при длительностях его фронта и спада в 10 нс

Г5-85

Генератор Г5-85 (рис. 2.24) был разработан следом за разработкой генератора Г5-78. Это первый из отечественных серийных генераторов, позволяющий получать импульсы с длительностью менее 1 нс и временами нарастания и спада 0,3 нс.



Рис. 2.24. Внешний вид генератора наносекундных импульсов Г5-85

Этот генератор имеет следующие технические характеристики:

- Частота повторения основных импульсов при внутреннем запуске 3 кГц — 1000 МГц.
- Длительность основных импульсов: регулируемая 1 нс — 200 мкс, нерегулируемая 0,5–1 нс.
- Амплитуда основных импульсов на нагрузке 50 Ом 0,2–2 В.
- Временной сдвиг 0,5 нс — 200 мкс.

- Длительность фронта (среза) основных импульсов 0,25 нс.
- Выброс на вершине импульса 10%.
- Неравномерность вершины и исходного уровня 5%.
- Смещение базовой линии -1,2...+1,2 В.

Генератор может использоваться для измерения временных параметров скоростных и сверхскоростных усилителей и компараторов, контроля переходных характеристик широкополосных осциллографов с полосой частот до примерно 500 МГц, тестирования и испытания высокоскоростной импульсной аппаратуры и т. д.

2.3.5. Универсальные генераторы импульсов серии 8500 фирмы Tabor

На рынке измерительной техники России *аналоговые генераторы импульсов* зарубежного производства почти не представлены. Более того, обзор ведущих фирм — производителей измерительной аппаратуры показал, что они почти повсеместно отказались от разработок и производства таких приборов.

Это может показаться странным, но только на первый взгляд. Дело в том, что генераторы импульсов аналогового типа имеют недостаточно высокие метрологические показатели, что сильно затрудняет их применение в тестировании и отладке современных электронных устройств. Требуемые технические характеристики таких устройств от аналоговых генераторов получить трудно и стоимость их при этом резко возрастает.

Между тем, аналоговые импульсные генераторы (за исключением наносекундных) успешно заменяются простыми и дешевыми функциональными генераторами, описанными в следующей главе. А для получения импульсов с рекордными параметрами и высокой их стабильностью куда более перспективными оказались генераторы импульсов с прямым синтезом формы и генераторы импульсов произвольной формы. К их массовому производству и приступили ведущие зарубежные фирмы.

Из "обычных" генераторов импульсов отметим появившиеся недавно на нашем рынке импульсные генераторы израильской фирмы Tabor Electronics Ltd. Серии 8500 и 8500-1. Внешний вид генераторов представлен на рис. 2.25. На рынок эти генераторы поставляет фирма "Прист".

Основные параметры генераторов серии 8500 следующие:

- Максимальная частота следования импульсов 50 МГц.
- Погрешность установки частоты 0,1%.
- Минимальное время нарастания и спада импульсов 6 нс.
- Плавная регулировка времени нарастания и спада до 20 мс.
- Длительность импульсов от 10 нс до 4 с.
- Регулируемая временная задержка до 10 с.
- Регулируемая скважность импульсов от 1 до 95%.



Рис. 2.25. Внешний вид генератора серии 8500 фирмы Tabor

- Амплитуда импульса на нагрузке 50 Ом до 16 В, полярность положительная и отрицательная.
- Диапазон смещения ± 12 В.
- Режимы работы: генерации парных импульсов, возможность внешнего запуска и внешней синхронизации.
- Встроенный цифровой частотомер.
- Интерфейс КОП.

Этот вполне современный прибор способен заменить целую линейку генераторов импульсов.

2.4. Генераторы телевизионных сигналов

2.4.1. Назначение и особенности генераторов телевизионных сигналов

Генераторы телевизионных сигналов предназначены для создания сложных импульсных сигналов, обеспечивающих построение на экране телевизионных приемников различных текстовых изображений — от изображения шахматного поля до тестовой заставки. Эти сигналы содержат не только импульсные испытательные сигналы, но и стандартные импульсы синхронизации телевизионных приемников и мониторов. Это позволяет оценивать степень геометрических искажений экрана, работу синхронизации и цветковых систем. Возможна оценка геометрического разрешения изображения и проверка тракта звукового сопровождения.

Генераторы реализуют тестовые сигналы в стандартах PAL, SECAM и др. Как правило, генераторы телевизионных сигналов имеют встроенный радиочастотный генератор и модулятор для создания стандартных радиосигналов.

У нас используется телевизионный стандарт SECAM. Однако имеется множество устройств (кассетные видеомэгнитофоны, DVD-проигрыватели), использующих и другие стандарты, например PAL и NTSC. В связи с этим большинство современных телевизоров и телевизионных мониторов поддерживает различные стандарты телевизионного вещания.

Требования к отечественным генераторам телевизионных сигналов должны удовлетворять ГОСТу 1871-83, введенному еще в 1983 году. К таким приборам относился генератор Г6-65, который позволял получать только часть тестовых сигналов. Этот прибор уже давно не выпускается, устарел технически и морально. А потому далее он не рассматривается. В 1992 году был введен новый ГОСТ 9845-92, который регламентирует вещание на телевизионных каналах I-V и устанавливает основные параметры, определяющие систему вещания, и методы их измерения. Ему должны удовлетворять разработки генераторов телевизионных сигналов. К сожалению, зарубежные генераторы не всегда удовлетворяют указанным стандартам.

2.4.2. Генератор телевизионных сигналов PG-401L фирмы EZ Digital

Типичным представителем зарубежных генераторов этого класса является простой генератор PAL PG-401L фирмы EZ Digital. Внешний вид этого прибора показан на рис. 2.26. Прибор имеет встроенный генератор сигналов различных телевизионных каналов, что позволяет испытывать ВЧ-радиотракт. Питание прибора батарейное.

Основные характеристики генератора телевизионных сигналов PAL PG-401L:

- Телевизионный стандарт: PAL.
- Цветные полосы 75% яркости.
- Цвета: белый, желтый, голубой, зеленый, пурпурный, красный, синий и черный.
- Фигуры: решетка, 15×12 линий; точки.
- Маркер угла.
- Цветовые поля (белое, красное, синее, зеленое).
- Фиксированные частоты каналов диапазонов VHF и UHF.
- Видеосигнал: 1 В (от пика до пика), 75 Ом.



Рис. 2.26. Внешний вид генератора телевизионных сигналов PAL PG-401L

- Звук: 1 кГц на несущей с частотой 4,5 МГц \pm 20 кГц.
- Питание: адаптер или сменные аккумуляторы 6 \times 1,5 В.
- Габариты: 80 \times 172 \times 36,5 мм.
- Масса: 380 г, включая батареи.
- Принадлежности: чехол, адаптер, аккумуляторы, радиокабель, видеокабель, инструкция.

Прибор прекрасно подходит для использования в телеателье телевизионными мастерами, работающими на вызовах. Он может применяться и радиолюбителями. Но не следует забывать, что он поддерживает генерацию сигналов в системе PAL.

2.4.3. Виртуальные генераторы телевизионных сигналов АКТАКОМ АНР-3125/3126

Наиболее доступными средствами для проверки и тестирования телевизионных приемников, работающих в системе SECAM, являются виртуальные генераторы телевизионных сигналов АСТАСОМ АНР-3125/3126, поставляемые на наш рынок фирмой "Эликс" [92, 93, 126].

Виртуальные приборы являются приставками к персональному компьютеру (ПК). Сами приставки конструктивно очень просты, поскольку основные органы управления у них отсутствуют, и нужные параметры задаются с помощью программного обеспечения, которое поставляется с ними.

Генератор телевизионных сигналов АСТАСОМ АНР-3125 удовлетворяет нормам ГОСТ 1871-83 и создает телевизионные видеосигналы и радиосигналы в формате телевидения SECAM. Внешний вид генератора с ПК и испытываемым телевизором показан на рис. 2.27.

Основные характеристики генератора АСТАСОМ АНР-3125:

- Два канала, АЦП с разрядностью 12 бит.
- Соответствие ГОСТ 1871-83.
- Возможность редактирования заданного испытательного сигнала.
- Возможность записи сигнала в файл и считывания его из него.
- Возможность создания сигналов внешними приложениями.
- Максимальная амплитуда сигнала 1,5 В от пика до пика.
- Встроенный отключаемый НЧ фильтр.
- Длина памяти 128 кбайт на канал.
- Связь с ПК через интерфейс USB 1.1 или параллельный порт LPT (EPP).
- Программное обеспечение под Windows 98/ME/NT4/2000/XP.

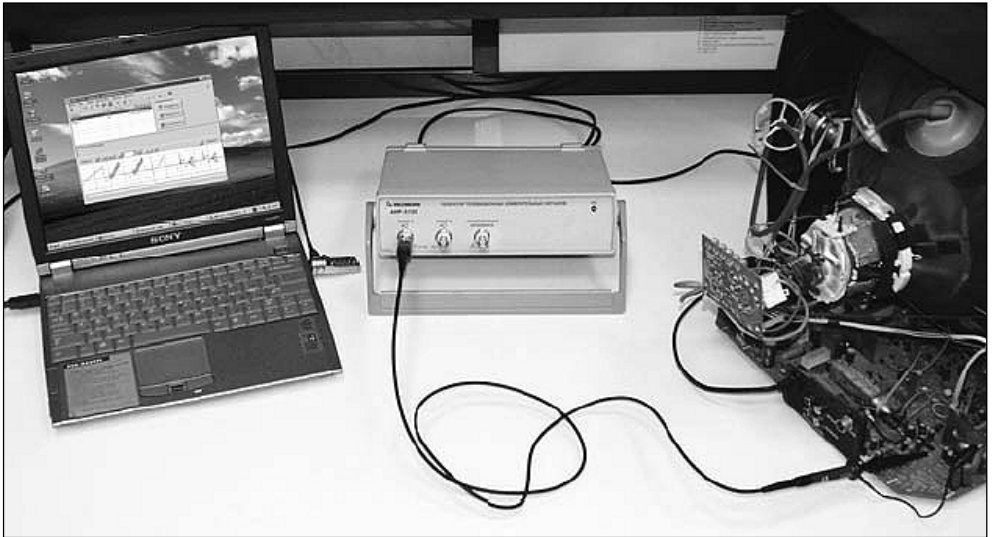


Рис. 2.27. Внешний вид генератора — приставки к ПК АСТАСОМ АНР-3125

- Встроенный источник питания от сети 220 В.
- Габаритные размеры 210×70×260 мм, масса 1,4 кг.

Интересной особенностью этого генератора и его программного обеспечения является возможность редактирования и задания испытательных сигналов, причем не только с помощью его собственного программного обеспечения, но и с помощью внешних приложений. На рис. 2.28 показано окно программы генератора АСТАСОМ АНР-3125 с выведенным окном редактирования сигнала. Этот сигнал есть и в области просмотра временной зависимости тестового сигнала основного окна программы.

Для выбранного сигнала возможны различные приемы редактирования. Например, можно создавать новые сигналы, комбинируя их из отдельных стандартных фрагментов (рис. 2.29). В сигнал можно вставить также любую выбранную строку.

Возможность выбора формы тестового сигнала иллюстрирует рис. 2.30. На этом рисунке показана также панель настройки с открытой вкладкой настройки цветовой схемы. Рис. 2.28–2.29 хорошо иллюстрируют простой и наглядный интерфейс программы, обслуживающей работу виртуального генератора АСТАСОМ АНР-3125.

Полезной функцией прибора является выработка импульсов синхронизации для запуска и синхронизации внешних устройств, например обычных осциллографов без специальной телевизионной системы синхронизации. При этом синхронизирующие импульсы можно соотносить не только с заданной строкой, но и перемещать их в пределах выбранной строки, что позволяет подробно рассматривать любой участок строки.

Указанные возможности генератора АСТАСОМ АНР-3125 позволяют успешно применять его при выполнении исследовательских и конструкторских работ по созданию новой телевизионной техники.

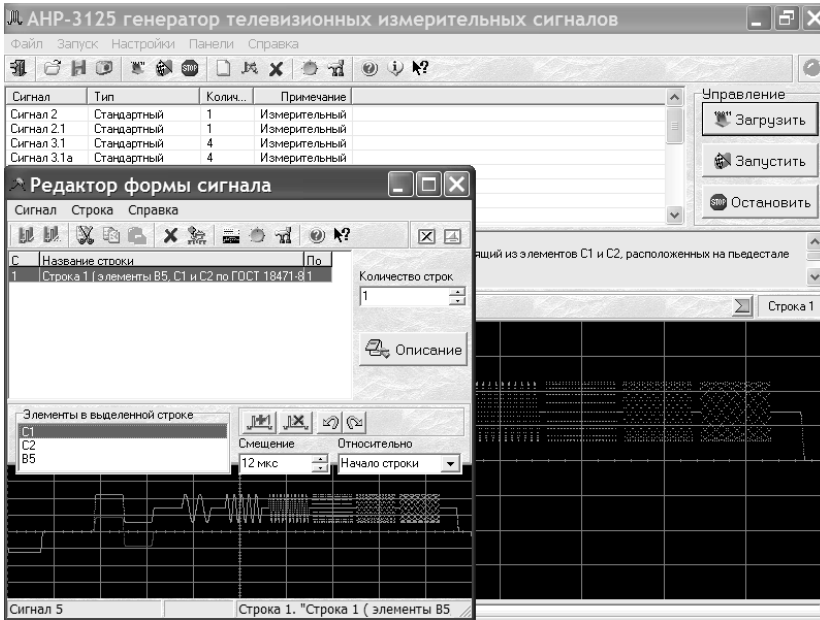


Рис. 2.28. Окно программы генератора АСТАСОМ АНР-3125 с окном редактирования сигнала (снизу и слева внутри основного окна)

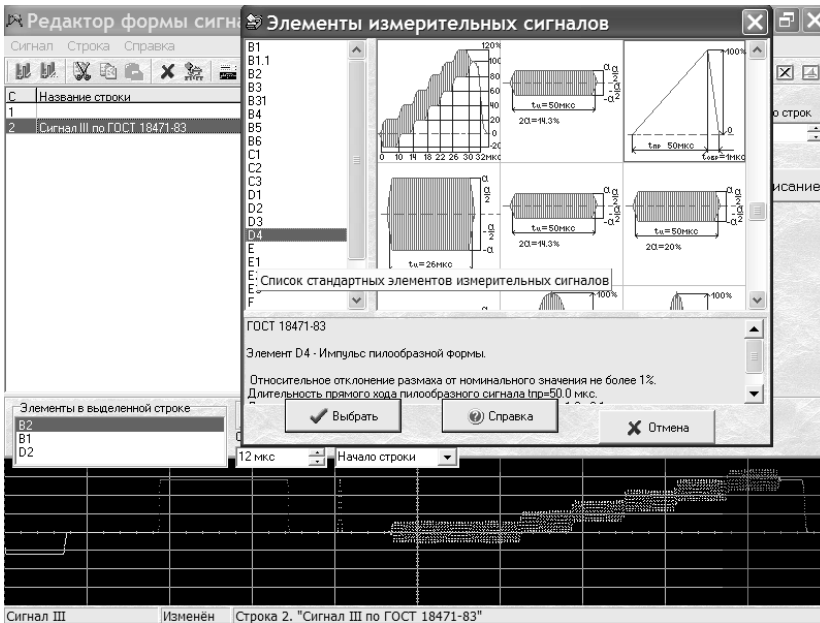


Рис. 2.29. Окно редактора сигналов и окно библиотеки фрагментов сигналов для вставки их в редактируемый сигнал

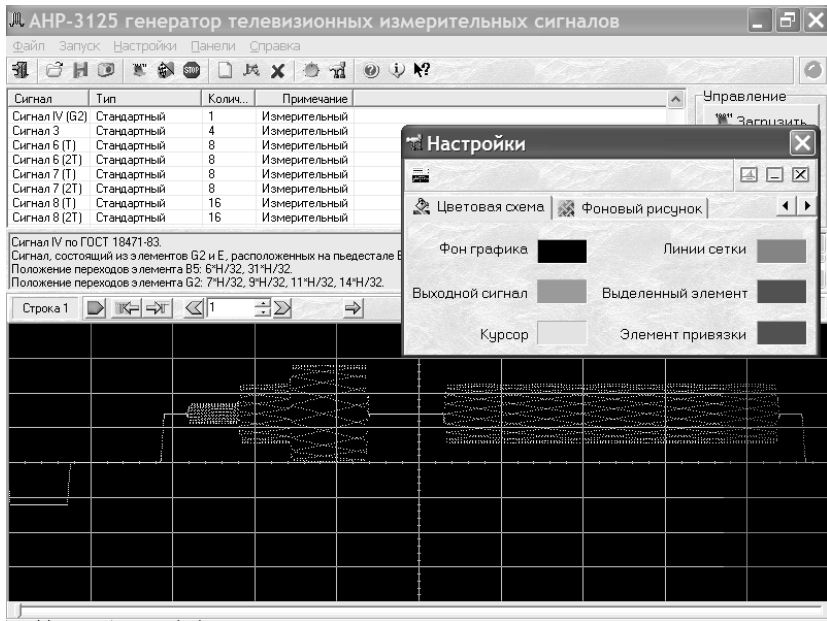


Рис. 2.30. Окно программы генератора АСТАСОМ АНР-3125 с панелью настройки

Более поздняя модель виртуального генератора телевизионных сигналов АСТАСОМ АНР-3126 удовлетворяет требованиям ГОСТ 1871-83/9845-92. В частности, на аналоговом выходе В генератора формируются уравнивающие импульсы, синхронизирующие импульсы строк и полей в соответствии с ГОСТ 9845-92. Внешний вид генератора аналогичен приведенному для прибора АНР-3126.

Основные характеристики генератора АСТАСОМ АНР-3126:

- Два канала аналоговых и 1 цифровой.
- АЦП с разрядностью 12 бит.
- Соответствие ГОСТ 1871-83 и ГОСТ 9845-92.
- Количество испытательных сигналов — 26.
- Возможность записи сигнала в файл и считывания его из него.
- Номинальный уровень сигнала на нагрузке 75 Ом от -0,3 до +0,7 В.
- Пределы регулировки уровня белого от 0,25 до 1,25 В.
- Пределы регулировки уровня черного от 0 до 1,5 В.
- Уровень гашения 0 В.
- Пределы регулировки уровня синхронизации от 0 до 0,5 В.
- Длина памяти 128 кбайт на канал.
- Связь с ПК через интерфейс USB 1.1 или параллельный порт LPT (EPP).
- Программное обеспечение под Windows 98/ME/NT4/2000/XP.

- Встроенный источник питания от сети 220 В.
- Габаритные размеры 210×70×260 мм, масса 2 кг.

Работа с генератором АСТАСОМ АНР-3126 подробно описана в работе [93]. На рис. 2.31 показан вид спереди телевизора, на экране которого видно изображение черно-белой рамки и полос для проверки четкости телевизора.



Рис. 2.31. Вид телевизора с изображением, создаваемым одним из тестовых сигналов (черно-белая рамка)

2.4.4. Линейка генераторов телевизионных сигналов корпорации Tektronix

Большое число генераторов телевизионных сигналов выпускает корпорация Tektronix. В основном, это стационарные приборы высочайшего класса и высокой степени универсальности, применяемые в студиях телевизионной записи и вещания и в серьезных лабораториях. Обзор линейки таких генераторов дан в обзоре, размещенном в Интернете по адресу: <http://rus.625-net.ru/625/1999/08/r8.htm>

Семейство портативных (ручных) генераторов испытательных сигналов представляют генераторы TSG601 и TSG95.

TSG601 — генератор последовательных цифровых компонентных сигналов. Его внешний вид показан на рис. 2.32. Генератор формирует 16 различных испытательных сигналов, используемых для измерений в аппаратуре формата 4:2:2. Полностью совместим с портативным анализатором SDA601.

Генератор имеет встроенный последовательный цифровой интерфейс (SDI). Амплитуда выходного сигнала генератора может изменяться относительно уровня, задава-

емого SMPTE, в пределах $\pm 10\%$, а встроенный эквивалент 50-метрового кабеля может быть применен для согласования с измеряемой аппаратурой. Для проведения измерений цифрового сигнала достаточно нажатия одной кнопки на передней панели. Результаты проведенных измерений выводятся на встроенный ЖК-дисплей, на дополнительный внешний монитор, или передаются на PC и принтер. Во время интервала гашения в цифровом видеосигнале может передаваться испытательный звуковой сигнал (до четырех каналов — тон или пауза). Имеется также возможность управлять сопротивлением нагрузки (короткое замыкание, обрыв или ошибка выбора величины 75/50 Ом).



Рис. 2.32. Портативный генератор телевизионных сигналов TSG601 корпорации Tektronix

Для упрощения работы с генератором в долговременной памяти устройства может быть запомнено до четырех различных пользовательских установок. Питание устройства осуществляется от восьми элементов питания типа AA или от никель-кадмиевой аккумуляторной батареи.

TSG95 — генератор аналоговых композитных сигналов PAL/NTSC. В его памяти хранится 20 различных видов испытательных сигналов PAL и 16 — NTSC. Генератор позволяет вводить в сигнал до восьми различных идентификационных сообщений, каждое из которых содержит до двух строк по шестнадцать знаков каждая. Обеспечивается ввод до 13 фиксированных звуковых сигналов частотой от 50 до 20000 Гц или сигнал генератора качающейся частоты. Имеется три фиксированных амплитуды звукового сигнала: 0, +3 и +8 дБ. Питание прибора осуществляется от восьми батарей типа AA, либо от никель-кадмиевой аккумуляторной батареи, заказываемой дополнительно.

Из стационарных генераторов отметим наиболее мощные модели — TPG20 и TG2000. TPG20 — телевизионный генератор широкого применения, который содержит более 70 типов испытательных сигналов, хранящихся в его памяти. Композитные выходные сигналы поддерживаются для трех стандартов: NTSC, PAL и SECAM, компонентные —

для Y/R-Y/B-Y, RGB, Y/C. Прибор обеспечивает аналоговые, последовательные и параллельные цифровые выходы, причем имеет место соответствие сигналов на аналоговых и цифровых выходах (если выбран режим цифрового композитного сигнала, то на аналоговом выходе тоже присутствует композитный сигнал; аналогично и для компонентного цифрового сигнала).

У прибора возможно программированное управление очередностью появления сигналов на выходе генератора, а также формирование и ввод в сигнал логотипа пользователя и идентификационной строки. Кроме того, используя персональный компьютер, можно программировать различные другие пользовательские испытательные сигналы, отсутствующие в библиотеке прибора. Все генерируемые TPG20 сигналы формируются путем цифрового синтеза, что обеспечивает их высокие технические характеристики и стабильность во времени. Возможно до девяти различных вариантов установок, которые могут быть вызваны из памяти простым нажатием кнопки на передней панели блока. Генератор имеет удобную переднюю панель, на которой размещены органы управления, переключатели режимов работы и ЖК-дисплей.

TG2000 — многофункциональный прецизионный генератор аналоговых и цифровых телевизионных сигналов, предназначен для выполнения всевозможных измерительных работ в процессе эксплуатации как аналогового, так и цифрового оборудования. Удобная библиотека измерительных сигналов, легкодоступное меню, модульная конструкция, достаточный объем памяти — все это делает генератор незаменимым для применения в телевизионных аналоговых и цифровых аппаратных, на передающих центрах, в НИИ и др.

В состав TG2000 входят аналоговый генератор видеосигналов (AVG1), цифровой генератор видеосигналов (DVG1), широкополосный аналоговый генератор видеосигналов и специализированное программное обеспечение. При проведении измерений TG2000 полностью совместим с VM700T. Аналоговый генератор формирует сигналы в стандартах PAL, NTSC, SECAM, RGB, Y/C, Y/R-Y/B-Y. Формирователь сигналов — цифровой 12-разрядный синтезатор с опорной частотой 27 МГц.

Цифровой генератор формирует композитные сигналы NTSC, компонентные с 525 и 625 строками с цифровым стробированием частотой 13,5 и 18 МГц соответственно. Предусмотрено формирование как последовательных, так и параллельных сигналов. Цифровой звуковой сигнал (20 бит, 48 кГц) может быть добавлен к последовательному цифровому видеосигналу на выходе. Встраиваемый широкополосный аналоговый генератор позволяет проводить телевизионные измерения в полосе до 30 МГц. Для этого используется 12-разрядный синтезатор с тактовой частотой 72 МГц, формирующий специальный испытательный сигнал с очень высокой точностью и стабильностью. Его выходной сигнал — аналоговый композитный. Управление генератором осуществляется с передней панели или дистанционно по интерфейсу RS-232.

2.4.5. Стационарный генератор телевизионных сигналов Г6-35

Завершая рассмотрение генераторов телевизионных сигналов, стоит упомянуть отечественную модель стационарного генератора Г5-35. Он предназначен для определе-

ния основных качественных показателей телевизионных трактов радиорелейных, тропосферных и космических линий связи черно-белого и цветного телевидения по испытательным сигналам, вводимым в интервал кадрового гасящего импульса, или по периодическим измерительным сигналам.

Характеристики прибора:

- Количество периодических сигналов 12.
- Вводимые испытательные строки 17, 18, 330, 331, или 20, 21, 333, 334.
- Сигналы: опознавания — строка 16 или 19, телеуправления и телеметрии — строка 329 или 332.
- Эталонные сигналы частоты и времени — строка 6.
- Режимы работы генератора: периодический, периодический с введением; введение синхросмеси, введение, обход.
- Частота: строк 15625 ± 3 Гц, сигналов цветной поднесущей 4433618 ± 10 Гц.
- Полоса качания сигналов качающейся частоты 0,5–8,5 МГц.
- Номинальный размах импульсов 700 ± 7 мВ.
- Перекос вершины прямоугольных импульсов $\pm 0,5\%$.
- Различия усиления сигналов яркости и цветности $\pm 0,5\%$.
- Расхождение во времени сигналов яркости и цветности 10 нс.
- Импеданс входа и выхода 75 Ом.
- Интервал рабочих температур от 5 до 45°C .
- Относительная влажность при 25°C до 80 %.
- Питание (220 ± 22) В, $(50 \pm 0,5)$ Гц.
- Потребляемая мощность 220 В*А.
- Габаритные размеры прибора 480×213×500 мм.
- Масса 12 кг.

Этот генератор до сих пор применяется на предприятиях, занятых разработкой и выпуском телевизионной техники и в телевизионных студиях.

2.5. Генераторы коротких импульсов

2.5.1. Принципы генерации импульсов с субнаносекундным временем нарастания

Для проверки электронных осциллографов с полосой частот до 6 ГГц в СССР был разработан ряд генераторов испытательных импульсов серий И1-11, И1-14, И1-15,

И1-17, И1-18, И1-12. При этом для каждого номинала полосы пропускания осциллографа создавался генератор, выходной сигнал которого можно было считать "идеальной ступенькой". Мелкими сериями выпускались специализированные генераторы с временем нарастания не более 20 пс. Однако препятствием для дальнейшего развития средств измерений импульсного напряжения в СССР (да и ныне в России) явилось отсутствие соответствующей элементной базы и метрологического обеспечения скоростных осциллографов.

Как уже отмечалось в предисловии, в последнее десятилетие стало заметным отставание разработок импульсных генераторов перед разработками современных цифровых осциллографов и анализаторов спектра. Диапазон частот этих приборов, в частности стробоскопических осциллографов, достиг 100 ГГц. Это достигнуто, в частности, применением новейшей элементной базы на основе гетеропереходных кремний-германиевых микротранзисторов, реализованных в составе специализированных монокристаллических интегральных микросхем.

Однако, непосредственное применение этой элементной базы в измерительных генераторах невозможно из-за малых уровней рабочих напряжений и токов таких микротранзисторов и резкой потери быстродействия в реальных условиях работы их в импульсных генераторах. Между тем последние должны не отставать, а опережать уровень технических решений скоростных схем, применяемых в осциллографах.

Один из советских генераторов Г6-22 формировал импульсы с амплитудой до 15 В при длительности импульса 5 нс (длительность переднего фронта 3 нс, заднего 2 нс) при частоте повторения 10–110 МГц. При этом прибор имел габариты 496×475×295 мм и массу 32 кг!

О трудностях применения обычной схемотехники, даже на основе специализированных интегральных микросхем, говорит опыт разработки отечественных генераторов импульсов Г5-78 и Г5-85. Напомним, что последние имели времена нарастания импульсов 0,5 и 0,25 нс при амплитуде импульсов соответственно 5 и 2 В. Так что уже при преодолении порога в 1 нс для времен нарастания и спада импульсов заметно резкое снижение амплитуды импульсов. Заметим, что конструкция таких приборов осложняется требованиями тщательного согласования всех блоков и необходимостью работать 50-омными входными и выходными сопротивлениями блоков [111].

Большие надежды в свое время возлагались на туннельные диоды — приборы, имеющие N-образные ВАХ. Однако эти приборы принципиально низковольтные — создаваемые ими перепады напряжения составляют доли В. Применение туннельных диодов в формирователе перепадов с длительностью около 50 пс описано в главе 5.

В ряде случаев хорошими, а подчас просто уникальными, характеристиками обладают схемы на лавинных транзисторах [21, 73]. Это единственные из полупроводниковых приборов, которые непосредственно и без внешних формирователей способны генерировать импульсы с амплитудой в десятки В и током в десятки А при временах их нарастания порядка 1 нс, а иногда и намного меньше. Однако получение от них импульсов с временами нарастания в единицы пикосекунд невозможно. Схемы на лавинных транзисторах перспективны для построения генераторов для запуска лазерных дио-

дов и лазерных решеток и для управления электронно-оптическими затворами, мощными полевыми транзисторами, приборами с электронной бомбардировкой полупроводниковой мишени и др.

Есть ряд способов существенно уменьшить времена нарастания импульсов, формируемых обычными полупроводниковыми приборами, такими как лавинные транзисторы, СВЧ-биполярные и мощные полевые транзисторы. Так, уже давно применяются обострители перепадов на основе диодов с накоплением заряда [14], которые позволяют формировать импульсы с временами нарастания порядка десятков нс. Еще лучшие результаты получены от обострителей на арсенид-галлиевых диодах. Здесь возможно получение импульсов с временами нарастания и спада вплоть до 1 пс.

Однако очевидно, что и этот путь не решает задачу кардинально. Кардинальное решение может базироваться на новых физических принципах. К таким решениям относятся оптико-электронные импульсные устройства, у которых сигнал получается благодаря воздействию на широкополосный фотоприемник (лавинный или p-i-n фотодиод) оптических импульсов с субнаносекундным временем нарастания. Генерация таких импульсов была реализована давно, когда был обнаружен эффект резкого укорочения фронта оптического импульса при запуске некоторых типов лазерных диодов. Но лишь недавно появились разработки серийных генераторов импульсов с пикосекундными перепадами на основе этого метода создания импульсов.

Этот метод генерации импульсов пригоден для получения импульсов обычной для измерительных генераторов амплитудой в единицы В и, гораздо реже, в десятки В. Как правило подобные генераторы имеют выносной формирователь импульсов. Ныне они, как и генераторы импульсов на лавинных транзисторах, выпускаются фирмой Picosecond Pulse Lab, США.

Однако некоторые новые области применения коротких импульсов, такие как видеоимпульсные локаторы и георадары, требуют импульсов с амплитудой от десятков В до десятков кВ. В принципе, такие импульсы можно получать, используя последовательное и комбинированное включение множества лавинных транзисторов и разрядников на других типах полупроводниковых приборов.

Возродился интерес и к газоразрядным и вакуумным разрядникам. Так, уже давно водородные тиратроны применялись для формирования мощных наносекундных импульсов. Их большим недостатком была большая и нестабильная задержка запуска. Однако были разработаны специальные тиратроны с постоянно тлеющим запускающим электродом — криотроны. Их запуск с помощью схем на лавинных транзисторах позволил создать сверхскоростные разрядники с приемлемым временем задержки запуска и его приемлемой стабильностью.

2.5.2. Генератор HZ60-3 для испытания аналоговых осциллографов

Для измерения времен нарастания и установления переходных характеристик современных аналоговых и цифровых осциллографов нужны специальные генераторы ис-

пытательных импульсов со временем нарастания в доли нс. Один из таких приборов HZ60-3 с названием Scope Tester (осциллографический тестер) выпускается фирмой HAMEG. Его внешний вид показан на рис. 2.33.



Рис. 2.33. Осциллографический тестер HZ60-3

Этот очень простой прибор с батарейным питанием имеет следующие технические характеристики:

- 7 высокостабильных кварцеванных частот для калибровки разверток: 1-10-100 Гц, 1-10-100 КГц и 1 МГц.
- Калиброванные постоянные напряжения.
- Выход импульсов с временем нарастания менее 1 нс.
- 3 уровня напряжений: 25 мВ на нагрузке 50 Ом, 0,25 В и 2,5 В.
- Работа от батарей — 4×1,5 В (элементы АА).
- Три высокоэкономичные интегральные микросхемы.
- Размеры: 125×80×42 мм.

Возможности этого прибора ограничены — можно проверять переходную характеристику осциллографов с полосой частот до примерно 200 МГц.

2.5.3. Исследование динамики излучения лазерных диодов

В *волоконно-оптических линиях связи* (ВОЛС) в качестве источников излучения широко применяются *полупроводниковые инжекционные лазеры* непрерывного действия малой мощности. Но при модуляции этих излучателей с высокой скоростью ($f_M \geq 1$ ГГц) на форму передаваемого оптического сигнала существенное влияние оказывают переходные процессы в них.

При модуляции лазеров прямоугольными импульсами тока наблюдается временная задержка светового отклика

$$t_3 = \tau_c \ln[I_H / (I_H - I_P)],$$

где I_H — амплитуда тока накачки лазера; I_{II} — пороговый ток; τ_c — эффективное время жизни носителей. Кроме того, импульсы лазерного излучения имеют вид затухающих осцилляций с периодом колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\tau_c \tau_\phi / (I_H / I_{II} - 1)}.$$

Простейший метод исследования временных параметров полупроводниковых лазерных диодов основан на использовании формирователя с субнаносекундным временем нарастания токовых импульсов, быстродействующего фотоприемника и стробоскопического осциллографа.

На рис. 2.34 показана схема установки (была разработана в Смоленском филиале МЭИ еще в конце 70-х годов) для определения динамических характеристик маломощных полупроводниковых инжекционных лазеров. В схеме формирователя используется сочетание генератора на серийном германиевом лавинном транзисторе VT1 и ключа на мощном МДП-транзисторе с горизонтальным каналом, который увеличивает нагрузочную способность формирователя.

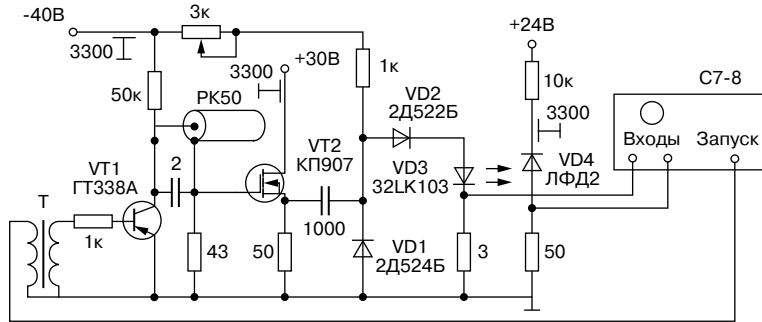


Рис. 2.34. Схема установки для определения динамических характеристик полупроводниковых инжекционных лазеров

Для обострения фронта токовых импульсов применен диод с накоплением заряда VD1 (типа КД524Б). Амплитуда тока накачки лазера плавно регулируется от 0 до 1 А при изменении питания ПТ. Длительность формируемых импульсов задается длиной высокочастотного кабеля, выполняющего роль накопительной линии. В небольших пределах длительность импульсов тока может регулироваться путем изменения прямого тока через VD1.

Запуск формирователя осуществляется импульсами синхронизации, создаваемыми самим осциллографом, что позволяет получать на экране устойчивое изображение, но можно использовать и внешний запуск. Световые импульсы регистрируются лавинным фотодиодом VD4, сигнал с которого подается непосредственно на второй вход осциллографа без применения промежуточных усилителей, которые неизбежно бы исказили его. Для уменьшения наводок фотодиод вместе с шайбовым сопротивлением монтируется в переходном соединителе коаксиального кабеля.

На рис. 2.35 представлены осциллограммы перепада тока накачки лазерного диода и светового сигнала, полученные в данной схеме при исследовании динамических ха-

рактических инжекционных лазеров с двойной гетероструктурой. Из них видно, что формирователь обеспечивает импульсы тока амплитудой около 1 А и временем нарастания порядка 0,4 нс. Отчетливо видны эффекты задержки и обострения фронта лазерного излучения, а также возникновение колебаний после формирования короткого фронта.

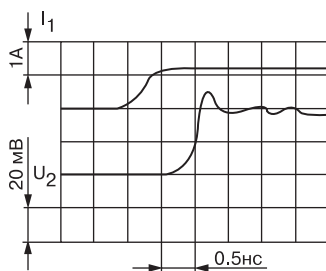


Рис. 2.35. Осциллограммы перепада тока накачки лазерного диода (луч 1) и сигнала с фотодиода (луч 2)

Аналогичные результаты были позже получены зарубежными исследователями. На рис. 2.36 представлены осциллограммы излучения трех лазерных диодов при запуске их от генератора на специальных лавинных транзисторах фирмы Zetex. Генераторы обеспечивали фронт импульсов около 3–4 нс, т. е. значительно больший, чем в описанных выше генераторах с формирователями на полевых транзисторах. Однако амплитуда импульсов тока была на порядок выше. В двух из трех лазерных диодах отмечено появление сверхкороткого выброса лазерного излучения, а у одного из лазерных диодов этот эффект выражен очень резко.

Как уже отмечалось, эффект обострения импульсов лазерного излучения и появления его сверхкороткого пика может найти применение при построении генераторов импульсов с малой (менее 1 нс) длительностью.

2.5.4. Генераторы пикосекундных импульсов серии 4000 фирмы Picosecond Pulse Lab

Для получения особо коротких импульсов нужна разработка специальных электронно-оптических систем, совмещающих в себе и генератор импульсов, и осциллограф, и использующих в своей работе источники лазерного излучения с длительностью фронта импульсов от 0,5 пс и фотоэлектронные преобразователи. Это теоретически может обеспечить контроль нового поколения цифровых осциллографов с полосой частот до 500 ГГц.

Метрологические системы на основе электронно-оптических систем уже созданы в США и Великобритании. Одна из таких систем разработана и применяется в компании Picosecond Pulse Lab, США. Эта компания более четверти века занимается разра-

боткой и производством метрологических приборов для измерений во временной области и тесно сотрудничает с Национальным Метрологическим Институтом США NIST. Это позволило компании создать и выпустить на рынок целую серию генераторов пикосекундных импульсов. Они поставляются на наш рынок компанией "Прист" [129]. Технические характеристики серии 4000 таких генераторов представлены в таблице на рис. 2.37.

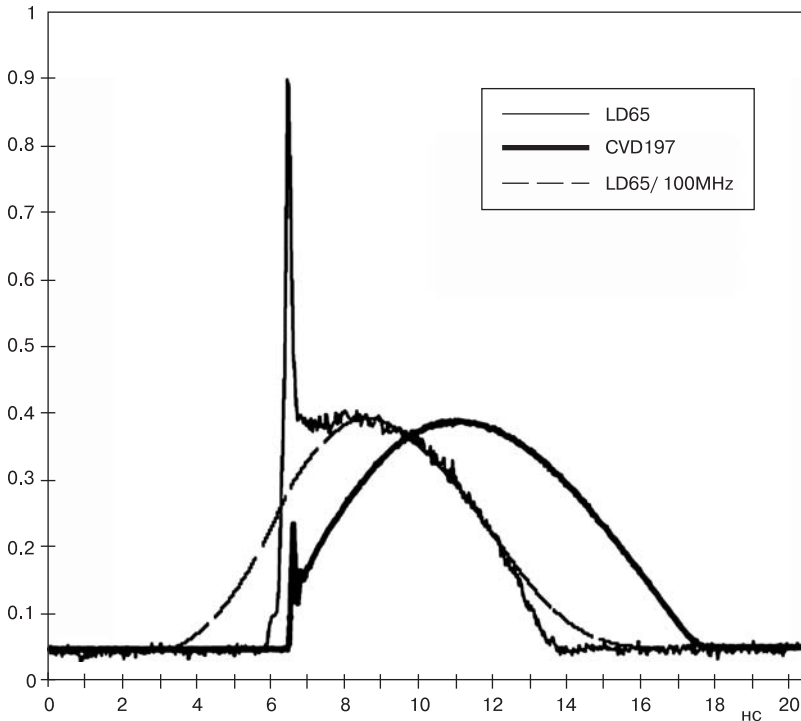


Рис. 2.36. Осциллограммы интенсивности лазерного излучения (сигнал от скоростного фотодиода) для трех полупроводниковых лазерных диодов

Генераторы этой серии обеспечивают амплитуды испытательных импульсов от 5 до 35 В (гарантировано с нормированием 30 В), время нарастания импульсов от 5 пс, выброс на вершине импульса от 2% и неравномерность вершины импульса от 0,1%.

Среди этой линейки непосредственной заменой самому "быстрому" серийному отечественному генератору И1-12 (на основе блока Я4С-89 универсальной измерительной системы) является модель 4050 (рис. 2.38). Генератор И1-12 был построен на основе формирователя на туннельном диоде и обеспечивал получение перепада напряжения на нагрузке 50 Ом с амплитудой 0,5 В и длительностью 50 пс. Модель 4050, выходной формирователь которой построен на лавинном транзисторе, позволяет получить в двадцать раз большую амплитуду выходного импульса (10 В против 0,5 В у И1-12) при одинаковом времени нарастания 50 пс.

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	4005	4015D	4016	4050B	4500E	
ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Время нарастания	8 нс	15 нс	<5 нс	45 нс	125 нс	
	Макс. амплитуда на нагрузке 50 Ом	5 В	-5 В	-5 В	10 В	30 В, регулир. с шагом 1 дБ до 80 дБ	
	Длительность импульса	16 нс	5 нс, затем спад 10 нс по экспоненте	5 нс, затем спад 10 нс по экспоненте	10 нс	20 нс	
	Полярность импульса	-	-	-	+	+	
	Время спада	70 нс	20 нс	20 нс	1 нс	1 нс	
	Выброс	20%	5%	10%	5%	2,5%	
	Неравномерность	±7% до 1 нс ±2% свыше 1 нс	±7% до 1 нс ±2% свыше 1 нс	±7% до 1 нс ±2% свыше 1 нс	±2% до 3 нс ±1% свыше 3 нс	2%	
	Период следования	0,1 Гц...1 МГц	1 Гц...500 кГц	1 Гц...500 кГц	1 Гц...500 кГц	1 Гц...100 кГц	
	Задержка	вн. синхр.	80 нс	80 нс	80 нс	80 нс	0...110 нс
		внеш. синхр	1 нс	14 нс	14 нс	14 нс	21 нс
Джиттер		1,5 пс ска	1,5 пс ска	1,5 пс ска	1,5 пс ска	3 пс ска	
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Выходной разъем	1,85 мм	1,85 или 2,4 мм	1,85 или 2,4 мм	2,92 мм	SMA	
	Напряжение питания	220 В	220 В	220 В	220 В	220 В	
	Габаритные размеры	76x19x254 мм	97x213x262 мм	97x213x262 мм	97x213x262 мм	89x432x330 мм	
	Масса	3,8 кг	3,6 кг	3,8 кг	3,6 кг	6,8 кг	
	Комплект поставки	Внешний формирователь + задающий генератор				генератор	

Рис. 2.37. Технические характеристики генераторов пикосекундных импульсов серии 4000 компании Picosecond Pulse Lab



Рис. 2.38. Внешний вид генератора перепада с длительностью 45 нс типа 4050 фирмы Picosecond Pulse Lab

Конструктивно генератор 4050 выполнен в корпусе под 19-дюймовую стойку, все органы управления вынесены на переднюю, панель и по функциональному назначению ничем не отличаются от органов управления старых отечественных генераторов испытательных импульсов. Единственным отличием является отсутствие регулировки длительности импульса, вызванное применением в формирователе лавинного транзистора. Для формирования прямоугольного импульса в такой схеме генератора применяется отрезок коаксиального кабеля, длина которого и задаёт длительность выходного импульса.

Естественно, что амплитуда испытательного импульса до 10 В открывает более широкие возможности по применению генератора как в метрологических целях (проверка параметров переходной характеристики широкополосных осциллографов на всех коэффициентах отклонения), так и в производстве (например, для накачки лазеров или для антенных измерений). Параметры выброса и неравномерности модели 4050 так-

же примерно в 2 раза лучше, чем у И1-12. На рис. 2.39 показаны осциллограммы перепадов генератора Picosecond 4050 и генератора И1-12. Для снятия осциллограмм использовался цифровой осциллограф LeCroy SDA 6000A с полосой пропускания 6 ГГц и частотой дискретизации 20 ГГц.

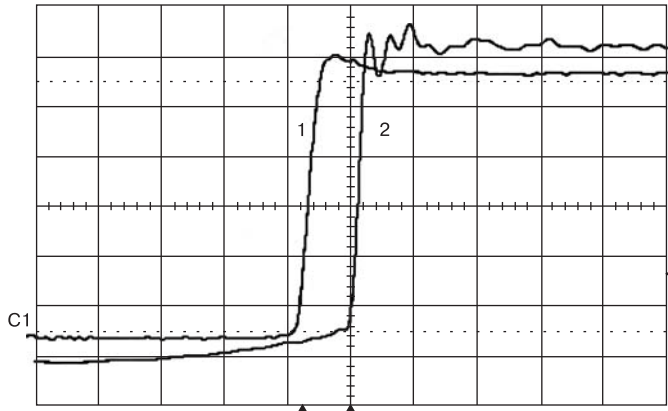


Рис. 2.39. Сравнение формы импульса от генератора Picosecond 4050 на лавинном транзисторе и генератора И1-12 на туннельном диоде

Наименьшую длительность перепада формирует генератор 4005. Его внешний вид показан на рис. 2.40. Как не трудно заметить, блоки формирования размещаются отдельно от основного модуля прибора — на рис. 2.40 они показаны справа. Какая элементная база используется для формирования 5-пикосекундного перепада, к сожалению, не сообщается.



Рис. 2.40. Внешний вид генератора 5-пикосекундного перепада 4006 фирмы Picosecond Pulse Lab

Кроме самих генераторов, компания Picosecond Pulse Lab предлагает широкий ассортимент дополнительных опций к ним, которые могут существенно расширить характеристики прибора без потери в точности, поскольку все опции также подвергаются

калибровке по параметрам, важным во временной области. К таким опциям относятся: аттенюаторы, расширяющие динамический диапазон; фильтры высокой частоты, служащие для увеличения времени нарастания выходного сигнала, но уменьшающие выброс; нелинейные компрессоры, служащие для уменьшения времени нарастания выходного сигнала; устройства развязки, позволяющие накладывать на выходной сигнал постоянное смещение; и т. д.

2.5.5. Импульсные генераторы и оптические модули фирмы DEI

Корпорация DEI (Directed Energy Inc.) развила работы по совместному применению лавинных транзисторов и мощных полевых транзисторов и создала серии промышленных генераторов мощных коротких импульсов для возбуждения лазерных диодов и лазерных светоизлучающих решеток. Первые сообщения о разработке этих модулей появились в 2000 г., и в последующие годы модули стали доступны на мировом рынке оптоэлектронных приборов и систем большой мощности.

Модули PCO-7110 (рис. 2.41) имеют вполне обычное конструктивное исполнение в виде миниатюрных печатных плат, на торце которых установлен импульсный лазерный диод [84].

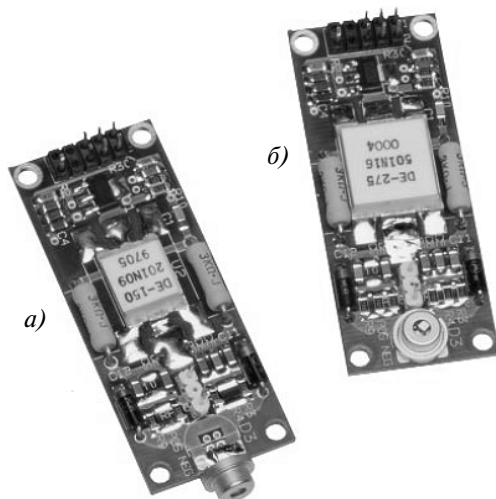


Рис. 2.41. Модули PCO-7110 фирмы DEI

Модули этого типа генерируют импульсы тока с амплитудой от 4 до 120 А и с длительностью от 4 до 65 нс. Осциллограммы импульсов показаны на рис. 2.42. Частота повторения импульсов от 2 до 50 кГц (меньшую частоту имеют более сильноточные модули). Предусмотрен мониторинг импульсов тока, протекающих через лазерный диод. Он может быть установлен на плату непосредственно или подключаться через коаксиальный кабель или микрополосковую линию. Выпускается 6 модулей этого типа на разные токи и дли-

тельности импульсов. Маркировка модулей указывает на максимальный ток и длительность импульсов, например, модуль 120-15 обеспечивает ток в импульсе от 5 до 120 А при длительности импульсов 15 нс и времени нарастания 2,5 нс. Амплитуда импульсов тока лазерного диода может изменяться в довольно широких пределах (в сторону уменьшения) до 10–20 раз. Масса модулей от 10 до 14 г, габариты 62,5×25,4×7,5 мм.

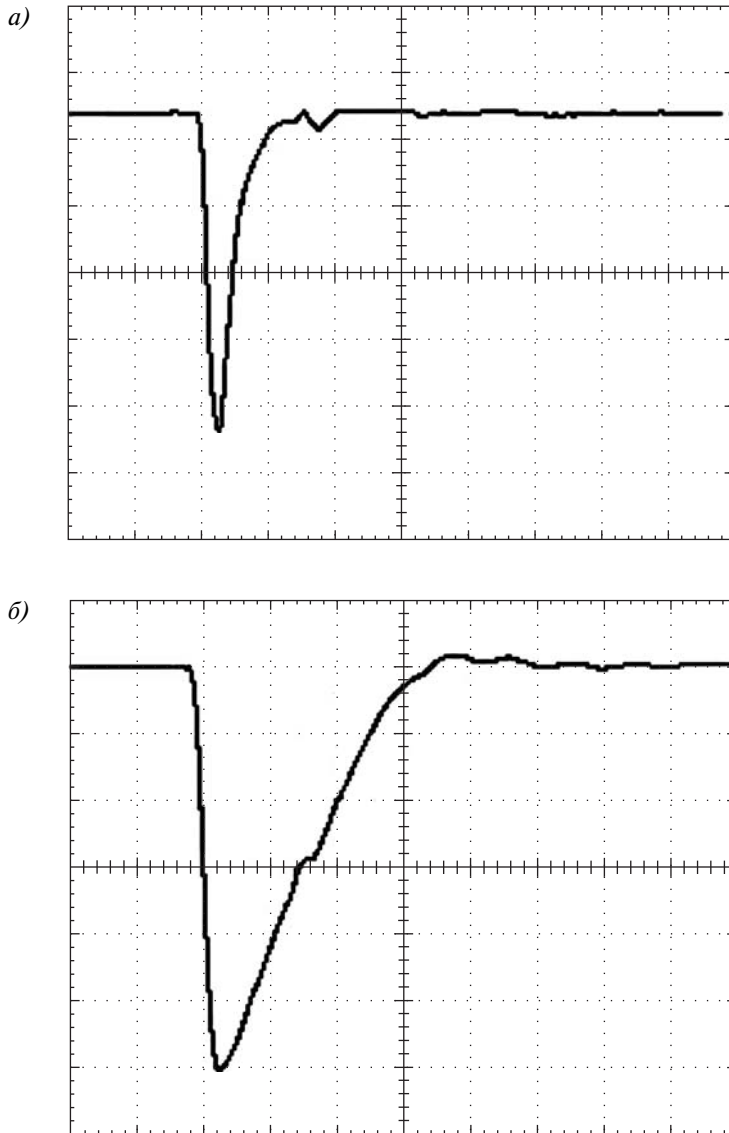


Рис. 2.42. Осциллограммы импульсов модулей РСО-7110 40-4 (масштаб 10 А/дел, 10 нс/дел) — а и 120-14 (масштаб 20 А/дел, 10 нс/дел) — б

Модули серии PCO-7810, разработанные в 2003 г. [85], обеспечивают импульсы с более высокой частотой повторения — до 200 кГц при амплитуде от 4 до 100 А и длительности от 4 до 12 нс (рис. 2.43). Лазерный диод подключается к модулям через кабельную или микрополосковую линию. Выпускается три модуля: 40-4, 50-12 и 100-9. Здесь также первая цифра указывает на ток в амперах, вторая — на длительность импульса. Максимальные частоты модулей 200, 67 и 25 кГц.

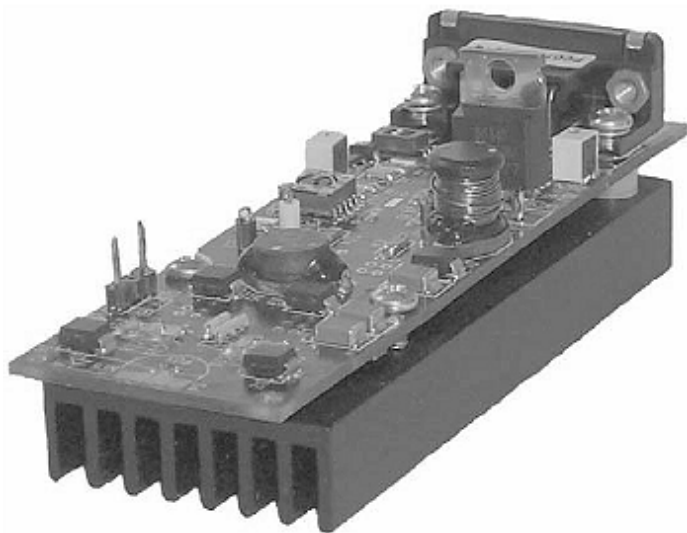


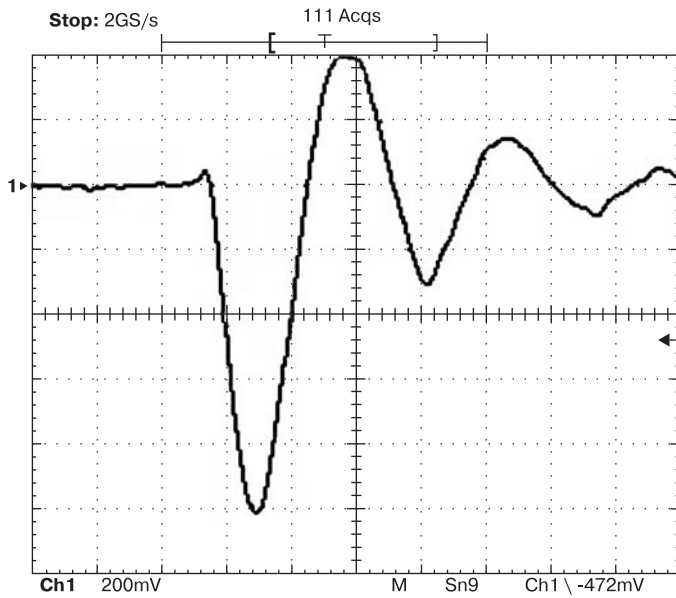
Рис 2.43. Модули PCO-7810 фирмы DEI

Осциллограммы импульсов тока модулей серии PCO-7810 показаны на рис. 2.44. Нетрудно заметить, что модуль 40-4 дает импульс со значительными колебаниями после него. Интересно, что форма оптического излучения практически повторяет форму импульсов. Модуль 50-12 дает импульсы большей длительности без заметных колебаний.

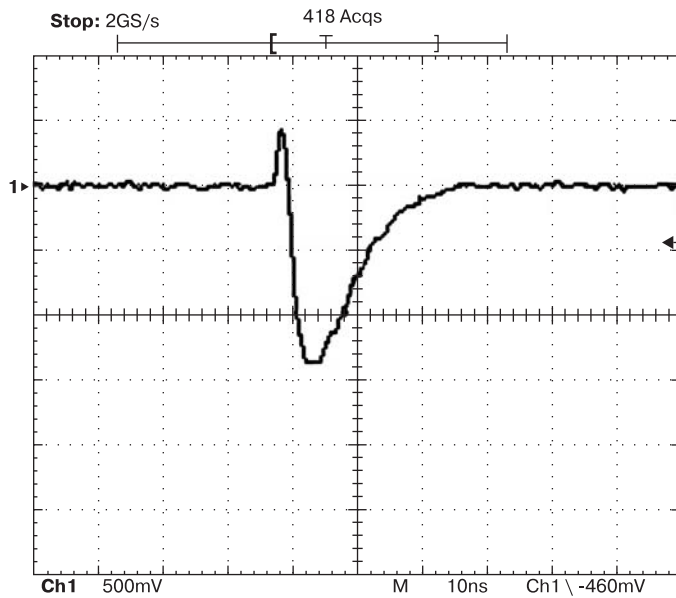
2.5.6. Высоковольтные модули HVS фирмы ALPHALAS

В области разработки импульсных лазеров нано- и субнаносекундного диапазона длительностей излучения одним из мировых лидеров является германская фирма ALPHALAS [130]. Наряду с лазерами фирма выпускает твердотельные высокоскоростные и высоковольтные ключевые *модули серии HVS* (рис. 2.45).

Модули используют современные коммутационные приборы (лавинные транзисторы и специальные переключатели — крайотроны). Выпускаются два типа модулей: с фиксированным напряжением питания HVS-XXX-F и переменным (регулируемым) напряжением питания HVS-XXX-V. Основные технические характеристики модулей представлены в табл. 2.1.



а)



б)

Рис. 2.44. Осциллограммы импульсов модулей PCO-7810 40-4 (масштаб 10 А/дел, 5 нс/дел) — а и 50-12 (масштаб 10 А/дел, 5 нс/дел) — б

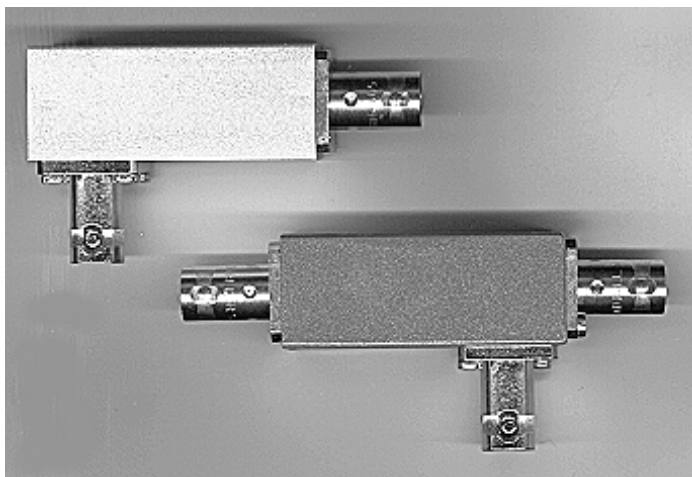


Рис. 2.45. Внешний вид модулей HVS фирмы ALPHALAS

Таблица 2.1. Параметры высоковольтных переключающих модулей серии HVS

Тип модуля	Напряжение питания, В	Ток в импульсе, А	Время задержки, нс	Время нарастания, нс	Уровень запуска, В
HVS-400-F	280–420	200	<1	4–10	5
HVS-2000-F	1500–2000	200	<1	4–10	5
HVS-4000-F	3500–4000	200	<1	4–10	5
HVS-900-V	300–900	300	<10	10–20	10
HVS-1400-V	300–1400	300	<10	10–20	10
HVS-4000-V	300–4000	300	<10	10–20	10

Модули HVS используются аналогично применению лавинных транзисторов и иных ключевых приборов. Типовые схемы применения модулей представлены на рис. 2.46. Следует помнить, что модули работают как высокоскоростной ключ, но S-образной ВАХ не обладают. Поэтому в автоколебательном режиме они не применяются.

Модули HVS предназначены для формирования импульсов с длительностью от 4 до 20 нс. Таким образом, для получения импульсов субнаносекундной длительности они не подходят. Небольшие габариты модулей, малая задержка запуска и запуск импульсами небольшой амплитуды относятся к достоинствам этих модулей.

2.5.7. Генераторы наносекундных импульсов на фотонно-инжекционных импульсных коммутаторах

К сожалению, высоковольтные лавинные транзисторы оказались неперспективными, поскольку у них приходилось увеличивать ширину ООЗ коллекторного перехода, что

вело к снижению времен включения с долей нс до единиц нс. Более практичным оказалось последовательное и комбинированное включение лавинных транзисторов, в том числе по хорошо известной еще по применению газовых разрядников схеме Аркадьева-Маркса. При этом последовательно включенные транзисторы включаются практически одновременно, что увеличивает амплитуду импульсов при сохранении времени включения на уровне одного транзистора.

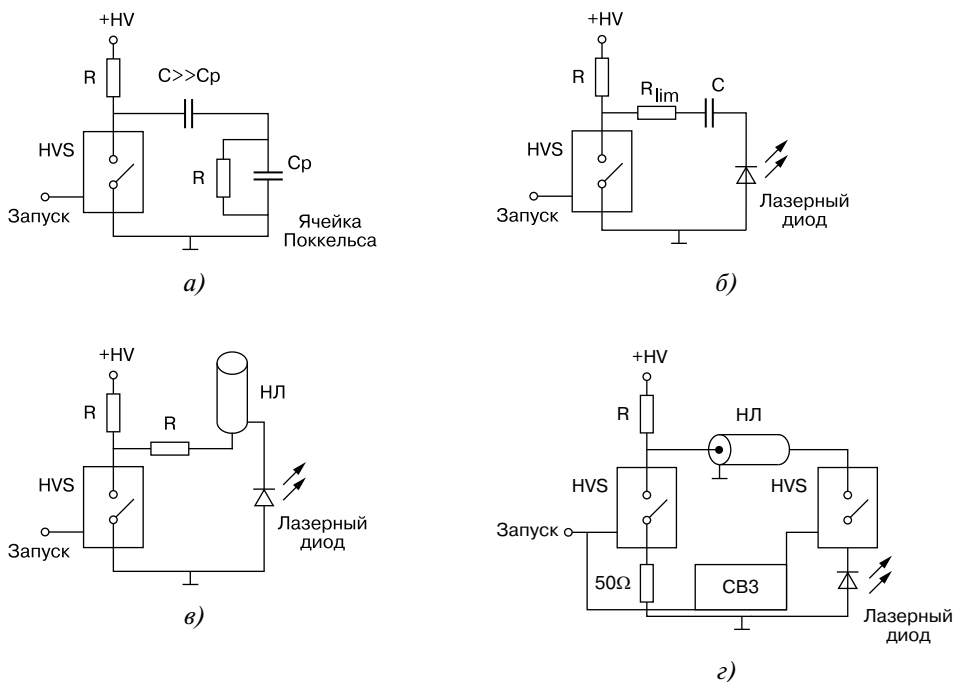


Рис. 2.46. Основные применения модулей серии HVS

Перспективным является применение в релаксаторах с наносекундной длительностью импульсов разрядников на арсенид-галлиевых (GaAs) приборах. Дело в том, что скорость дрейфа носителей в сильных полях у арсенида галлия намного выше скорости дрейфа носителей в кремнии и германии, что обеспечивает меньшие времена переключения. Однако, долгое время GaAs диоды и транзисторы были хотя и очень скоростными, но низковольтными приборами. Достаточно отметить, что рабочие напряжения серийных СВЧ GaAs транзисторы имеют рабочие напряжения на стоке не выше 10 В. Множество схем генераторов импульсов на этих приборах, в том числе с запуском от лавинных транзисторов, описано в [62-71].

Исследования, проведенные в физико-технологическом институте Иоффе, наметили пути разработки достаточно высоковольтных приборов на арсениде галлия, в том числе и использующих гетеропереходы. Были созданы диодные структуры с субнаносекундными временами выключения и твердотельные разрядники, напоминающие

по принципу применения лавинные транзисторы с электрическим и оптическим управлением.

Структура разрядника, названного *фотонно-ионный инжекционный коммутатор* (ФИИК), показана на рис. 2.47 (см. [131]). Разрядник представляет собой четырехслойную тиристорную структуру (оптотиристор), в середине которой имеется высокоомная область p^0 - π - n^0 , в которой создается ООЗ с двойной инжекцией. Верхний переход является светоизлучающим и обеспечивает быстрый запуск механизма лавинного включения структуры. Его включение обеспечивается управляющим электродом. Таким образом, внешне ФИИК является трехэлектродным прибором, как и лавинный транзистор.

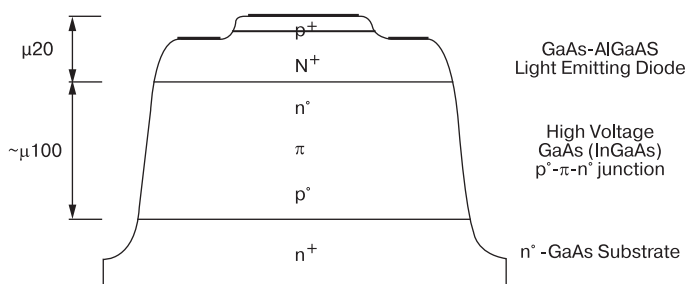


Рис. 2.47. Структура фотонно-ионного инжекционного коммутатора

Основные параметры трех разновидностей ФИИК показаны в таблице на рис. 2.48. Приборы имеют времена переключения в субнаносекундной области и в схемах ре-

Параметр / группа ФИИК	# 1	# 2	# 3
Допустимые напряжения в закрытом состоянии $U, В$	400	600	800
Импульсный ток в открытом состоянии $I, А$	50	75	15
Время нарастания импульса (по уровню $(0.1 \div 0.9)$), нс	0.25 (при 7 А) 1.5 (при 50 А)	0.3 (при 15 А) 2.5 (при 75 А)	0.2-0.5
Стабильность момента переключения Δt , пс	100	< 50	~ 50
Максимальная частота повторения импульсов PRF, кГц	5 (при 50 А)	20 (при 15 А)	100 (при $\leq 5 А$)
Максимальная длительность импульса тока T , нс	0.5-100		
Минимальная задержка, нс	< 10		
Рабочие температуры, °С	до 200		

Рис. 2.48. Типовые параметры трех типов ФИИК

лаксаторов, подобным таковым для лавинных транзисторов, формируют импульсы тока от единиц до десятков А. По задержке запуска они заметно уступают лавинным транзисторам (у последних она порядка 1 нс), но превосходят их по максимальному рабочему напряжению в выключенном состоянии и допустимой рабочей температуре.

Как коммутатор, ФИИК имеет следующие преимущества:

- субнаносекундные времена включения и выключения (!);
- высокая радиационная и температурная стойкость;
- большая мощность импульсов при малых потерях на включенном приборе;
- наносекундные времена задержки переключения.

На ФИИК был создан ряд моделей генераторов импульсов серии GFT для запуска лазерных диодов и лазерных светоизлучающих решеток. Их параметры представлены в таблице на рис. 2.49.

На рис. 2.50 представлены типовые осциллограммы импульсов, формируемых релаксатором на ФИИК при использовании различных накопителей энергии — линии и конденсатора.

На рис. 2.51 представлена таблица, на которой сравниваются параметры импульсов генераторов серии GFT с параметрами генераторов подобного класса ряда зарубежных фирм. Оценки последних также представляют интерес.

Модель генератора	Время нарастания, t, нс	Длительность импульса, T, нс	PRF, кГц	Амплитуда импульса U, В
GFT-1	0.3	0.5 - 20	50	250
GFT-2	0.35	1.5 - 15	50	400
GFT-3	<1	5 - 20	5	1000
GFT-4	1.5	5 - 15	1.5	2000
Модель генератора	Время нарастания, t, нс	Длительность импульса, T, нс	PRF, кГц	Амплитуда импульса I, А
GFT-5	0.3	0.5 - 50	0 - 50	7
GFT-6	0.3	3 - 50	0 - 20	15
GFT-7	1.5	3 - 50	10	30
GFT-8	2.5	5 - 10	5	75

Рис. 2.49. Параметры лабораторных моделей генераторов на ФИИК для запуска лазерных диодов

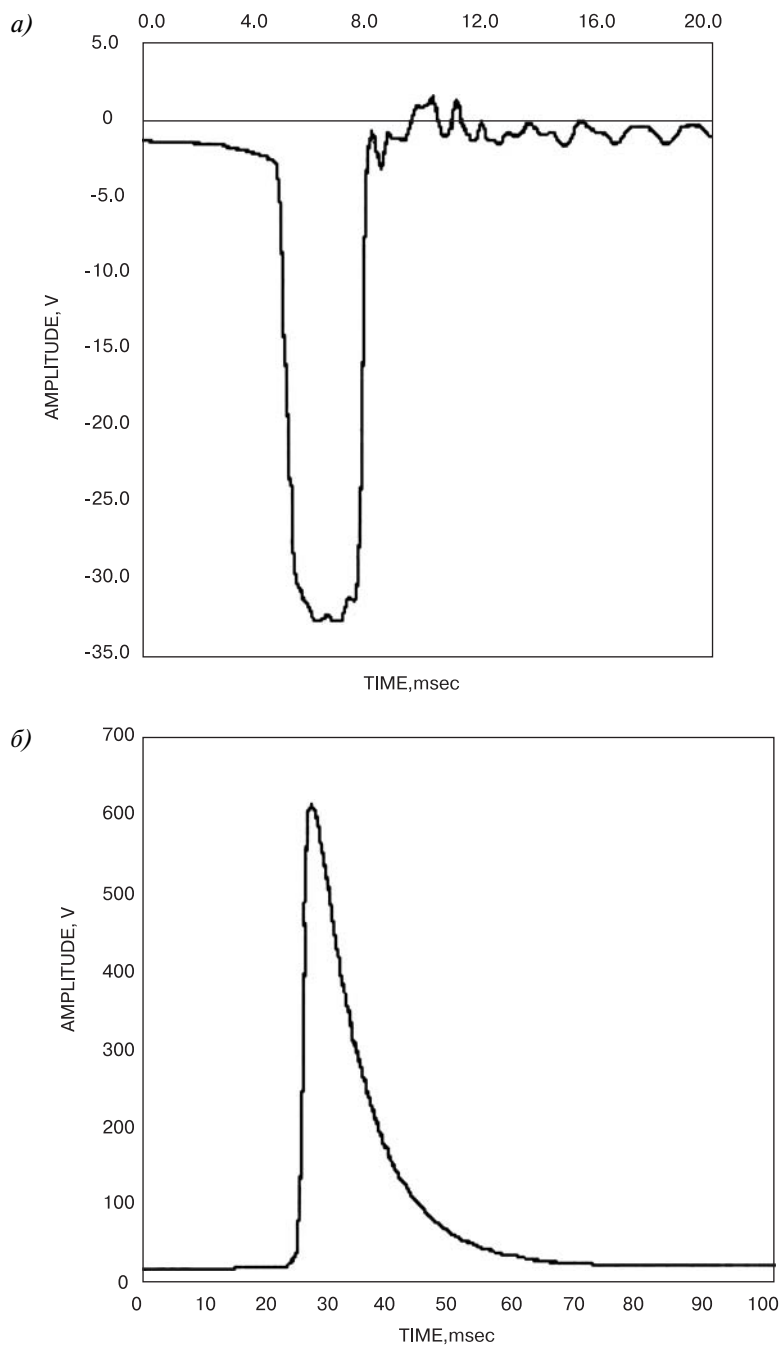


Рис. 2.50. Осциллограммы импульсов, формируемых релаксатором на ФИИК с разрядной линией (а) и конденсатором (б)

Производитель	Модель генератора	Время нарастания, t, нс	Длительность импульса, T, нс	PRF, кГц	Амплитуда импульса U, В
Ioffe Institute Politekhnikeskaja, 26 194021, St-Petersburg	GFT-1	0.3	0.5-20	50	250
	GFT-2	0.35	1.5-15	50	400
	GFT-3	<1	5-20	5	1000
	GFT-4	1.5	5-15	1.5	2000
Avtech Electrosystems Limited, P.O.BOX 265 New York 13669	AVI-V-C	0.3	2-100	0-20	50
	AVI-V-HV3-C	0.2	5-100	0-5	100
	AVL-3-C	0.5	5-100	0-5	350
	AVH-HV1	0.5	1.0	0-100	100
Kentech Instruments Ltd., South Moreton, Didcot, OXON, OX119AG UK (44)-235-510748	APG1	0.1	0.15	10	150
	MPS	0.5	10	0.1	1500
	BB10(*)	0.1	3	1	9000
	HMPS(*)	0.12	3	0.1	4000
Grant Applied Physics, Inc. 2011 Los Angeles, California 94707 (415)-526-7611	HMPS(*)	0.12	1	0.1	4000
	MPS	0.5	3	0.25	1500
	HMPS/F(*)	0.13	1	0.1	3500
	ASG1	0.1	8	0.75	200

(*) Стандартные модули имеют время жизни > 10⁸ импульсов и частоты повторения PRF > 100 Гц; модули, изготовленные по заказу - с PRF > 2 кГц.

Рис. 2.51. Сравнение генераторов импульсов серии GFT с параметрами подобных генераторов ряда зарубежных фирм

Функциональные генераторы

В этой главе описаны функциональные генераторы — устройства, генерирующие 3–4 сигнала различной формы, но с одной частотой. Простота этих генераторов и широкий диапазон плавной перестройки частоты привели к их массовому применению и выпуску в виде серийных приборов. Описаны принципы построения функциональных генераторов и серийно выпускаемые приборы этого типа.

3.1. Принципы построения функциональных генераторов

3.1.1. Основные типы функциональных генераторов

Функциональными генераторами принято называть генераторы нескольких функциональных зависимостей (сигналов), например, прямоугольных, треугольных и синусоидальных, формируемых с одной перестраиваемой в достаточно широких пределах частотой [8, 91]. Разнообразие форм сигналов расширяет сферы применения таких генераторов и позволяет использовать их для тестирования, отладки и исследования самой разнообразной электронной аппаратуры.

В отличие от *RC*- и *LC*-генераторов функциональные генераторы являются более широкодиапазонными — отношение максимальной частоты генерации к минимальной у них имеет нередко порядок 10^5 — 10^6 и выше. Наиболее часто функциональные генераторы используются при отладке ВЧ, НЧ и сверхнизкочастотных устройств. В СВЧ-диапазоне частот эти устройства не используются, за исключением применения в качестве источников модулирующих сигналов.

Функциональные генераторы делятся на два широких класса:

- *Аналоговые функциональные генераторы* на основе интегратора аналоговых сигналов в виде прямоугольных импульсов (меандра).
- *Цифровые функциональные генераторы* на основе дискретных (цифровых) интеграторов.

Помимо простоты реализации, аналоговые функциональные генераторы имеют одно неоспоримое преимущество перед их цифровыми собратьями — отсутствие сту-

пенек на участках роста и спада пилообразного и синусоидального выходных напряжений. Это особенно важно, если необходимо получение производной от выходного напряжения генератора. В этом случае ступеньки недопустимы, поскольку при переходе от одной ступеньки к другой производная устремляется к очень большим значениям.

Для реализации аналогового интегрирования применяют устройства заряда-разряда конденсатора неизменным током и схемы со 100% отрицательной обратной связью (емкостные интеграторы на интегрирующих усилителях постоянного напряжения).

Широкое распространение аналоговые функциональные генераторы получили после разработки высококачественных интегральных операционных усилителей, на которых стало возможно построение прецизионных *интеграторов*. Они и составляют основу функциональных генераторов. К сожалению, максимальная частота у таких генераторов обычно не превосходит 1–3 МГц и ограничена частотными свойствами применяемых операционных усилителей. Функциональные генераторы на основе заряда-разряда конденсатора с одной заземленной обкладкой реализуют максимальные частоты до 20–30 МГц, а в отдельных уникальных (лабораторных) разработках до 50 МГц.

3.1.2. Функциональные генераторы с интегратором на интегральном операционном усилителе

Принцип построения функциональных генераторов на основе *интегратора* со 100%-ной отрицательной емкостной обратной связью поясняет рис. 3.1. Основой генератора является интегратор И, построенный на интегральном операционном усилителе ОУ, и релейный элемент (РЭ) (рис. 3.1, *а*). Релейный элемент имеет гистерезисную передаточную характеристику, показанную на рис. 3.1, *б*.

При нарастании линейно-изменяющегося напряжения с выхода интегратора релейный элемент переключается (напряжение на выходе падает с $U_2 > 0$ до $U_1 < 0$), что ведет к изменению направления интегрирования интегратора И. Напряжение на его выходе становится линейно-падающим, и когда оно падает ниже уровня U_1 РЭ вновь срабатывает, и напряжение на его выходе становится равным $U_2 > 0$. Направление интегрирования вновь меняется, и процессы повторяются.

Как следует из описанного, функциональный генератор является типичным представителем *релаксационных генераторов* на основе релейного элемента, подобного широко известному триггеру Шмитта. При этом желательно (и даже необходимо), чтобы РЭ имел симметричную передаточную характеристику, удовлетворяющую условию $U_2 = |U_1|$. Это ограничивает число подходящих типов релаксационных генераторов, применяемых для построения функциональных генераторов.

Прямоугольные и треугольные импульсы (рис. 3.1, *з*) получаются вполне естественно, как результат работы релаксационного генератора. Но для получения синусоидального напряжения приходится использовать специальный нелинейный преобразо-

ватель Пр, функции которого поясняет рис. 3.1, в. Создание такого преобразователя является достаточно сложной технической задачей, и некоторые ее решения описаны далее.

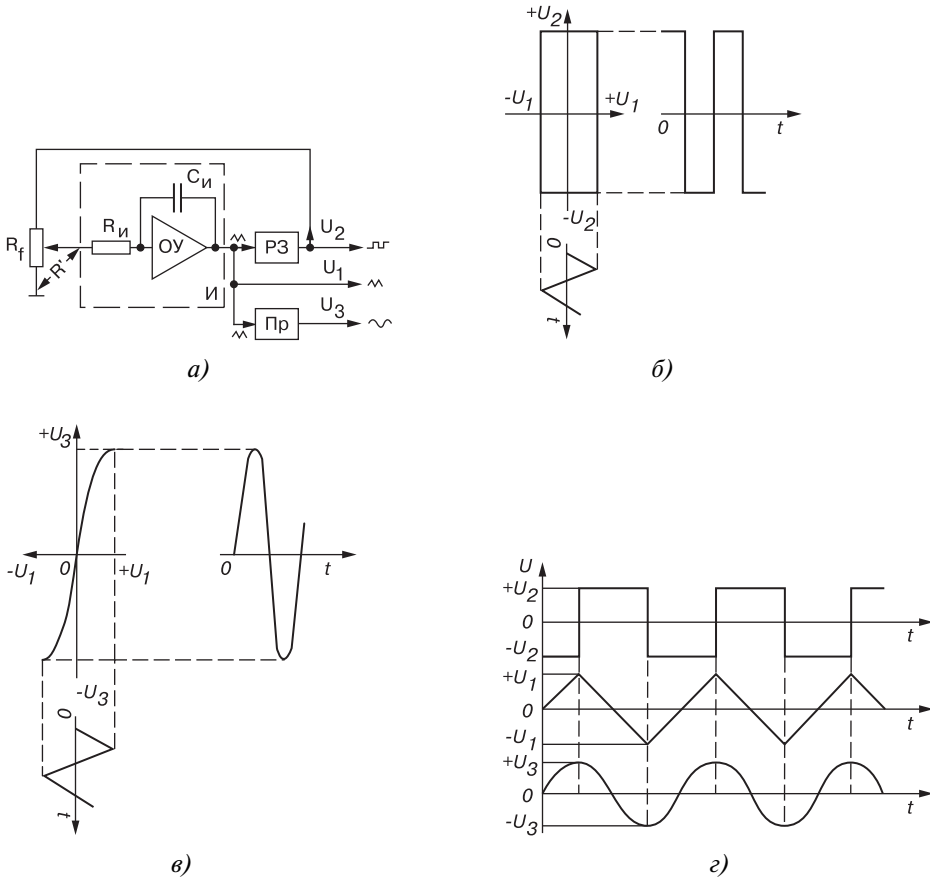


Рис. 3.1. Блок-схема функционального генератора (а) и диаграммы, иллюстрирующие его работу: переключения релейного элемента (б), преобразования треугольного напряжения в синусоидальное (в) и формы выходных сигналов (г)

3.1.3. Пример простой схемы функционального генератора

Довольно простая схема типичного функционального генератора, представленная на рис. 3.2, иллюстрирует принцип построения этого устройства. В генераторе могут использоваться любые универсальные операционные усилители с разнополярным питанием и симметричными передаточными характеристиками.

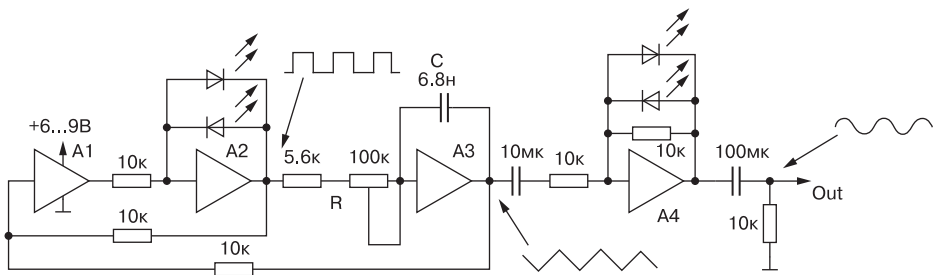


Рис. 3.2. Простая схема функционального генератора на интегральных операционных усилителях

Генератор содержит триггер на двух операционных усилителях A1 и A2 с ограничителем напряжения на светодиодах (эти приборы применены не потому, что они излучают свет, а вследствие своего повышенного прямого напряжения). Триггер управляет направлением интегрирования интегратора на операционном усилителе A3. Скорость линейного изменения напряжения на выходе A3 задается емкостью конденсатора C и величиной сопротивления резистора R . Обычно резистором R задается плавное изменение скорости изменения напряжения в 10–20 раз, а изменением C — фиксированное изменение скорости.

Если сигнал на выходе интегратора растет, то при достижении верхнего порога триггера он переключается, и направление интегрирования интегратора меняется — напряжение на его выходе начинает линейно падать, пока не достигнет нижнего порога интегрирования. При этом триггер вновь переключается, и направление интегрирования меняется, и т. д.

На выходе триггера формируются прямоугольные импульсы, а на выходе интегратора — треугольные. Для получения близкого к синусоидальному сигнала используется ограничитель треугольного напряжения. В данном случае он выполнен на операционном усилителе A4 с диодным ограничителем (тоже на светодиодах).

Параметры такого простого функционального генератора (прежде всего, максимальная частота и амплитуда сигнала) всецело зависят от применяемых операционных усилителей. Обычные операционные усилители могут использоваться до частот в десятки кГц и при амплитудах до 10–15 В. Однако новейшие сверхширокополосные операционные усилители, описанные в главе 1, могут использоваться для построения функциональных генераторов с частотами до десятков МГц, но с амплитудой импульсов до 3–5 В.

3.1.4. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током

При построении простых функциональных генераторов возможности управления их параметрами (прежде всего, частотой) оказываются ограниченными. Так, в генераторе на рис. 3.1 грубое изменение частоты можно организовать переключением конден-

сатора C , а плавное изменение частоты осуществляется измерением R . Кратность плавного изменения частоты может достигать десятков — сотен раз.

Однако для современных функциональных генераторов обычно необходима реализация электронного изменения частоты, а нередко и других параметров, например, несимметрии нарастающей и падающей частей треугольного (а нередко и "синусоидального") напряжения. Электронное изменение частоты с помощью управляющего напряжения или тока превращает функциональный генератор в генератор качающейся частоты и позволяет применять его для снятия амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик различных устройств и систем.

В принципе есть два способа электронного управления частотой функционального генератора:

- изменением токов заряда и разряда конденсатора;
- изменением уровней U_1 и U_2 срабатывания релейного элемента.

Второй способ обычно ведет к изменению амплитуды выходных сигналов, что чаще всего нежелательно. В связи с этим далее рассматриваются только такие структуры функциональных генераторов, у которых управление частотой реализовано только изменением тока заряда и разряда конденсатора. Заметим, что в общем случае различие уровней зарядного и разрядного тока позволяет получать несимметричные по длительности полупериодов сигналы.

На рис. 3.3 показана обобщенная блок-схема функционального генератора, управляемого напряжением U_0 , в частности, снимаемого с прецизионного проволочного потенциометра R_f . Блок управления частотой (БУЧ) создает пару напряжений или токов, которые могут иметь дополнительные приращения для осуществления частотной модуляции. Для этого на "вход ЧМ" подается модулирующее напряжение от относительно низкочастотного генератора.

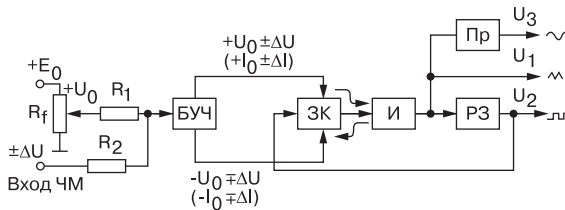


Рис. 3.3. Блок-схема управляемого и частотно-модулированного функционального генератора

На вход интегратора подаются попеременно (с помощью электронного коммутатора (ЭК)) напряжения или токи разной полярности, которые и определяют времена заряда и разряда конденсатора интегратора. Не учитывая частотную модуляцию для времен заряда и разряда конденсатора токами I_3 и I_p , можно записать идеализированные выражения:

$$t_3 = 2CU_m / I_3 \quad \text{и} \quad t_p = 2CU_m / I_p.$$

Для случая генерации симметричных колебаний ($I=I_3=I_p$):

$$T_o = t_p + t_r = 4CU_m/I \quad \text{и} \quad f_o = 1/T_o = I/4CU_m.$$

Чаще всего ЭК строится в виде мостовой схемы на кремниевых диодах с малыми обратными токами. Наилучшими являются диоды Шоттки, которые имеют малые напряжения в открытом состоянии, отличаются высоким быстродействием и практически не имеют задержки переключения из открытого состояния в закрытое.

Различают две основные блок-схемы функциональных генераторов. В первой, показанной на рис. 3.4, применяется блок управления частотой с преобразователем напряжения в напряжение (БУЧ-ПНН). В этом случае ЭК на основе диодного моста подключает к входу интегратора на ИОУ со 100%-ной емкостной обратной связью.

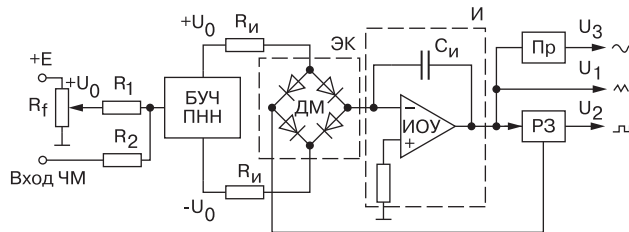


Рис. 3.4. Блок-схема функционального генератора с переключаемым напряжением на входе интегратора

В другом варианте блок-схемы (рис. 3.5) применяется блок управления частотой с преобразователем напряжения в ток (БУЧ-ПНТ). При этом в роли интегратора используется конденсатор $C_{\text{и}}$ с одной из заземленных обкладок. Для снятия с конденсатора пилообразного напряжения приходится использовать буферный усилитель БУ с как можно большим входным сопротивлением и хорошими частотными свойствами (частотой отсечки намного большей максимальной частоты генерации).

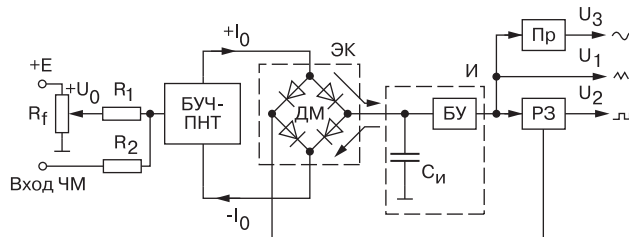


Рис. 3.5. Блок-схема функционального генератора с переключаемым током на входе интегратора-конденсатора

Практика и теоретические расчеты показали, что блок-схема на рис. 3.5 имеет явные преимущества перед блок-схемой на рис. 3.4: упрощается коммутация конденсатора C в многодиапазонных функциональных генераторах, меньше искажения треугольных импульсов в области вершин, на порядок и выше (при той же элементной базе) максимальная частота генерации.

Опыт разработки серийных функциональных генераторов в СССР до 80-х годов прошлого века показал, что генераторы на дискретной элементной базе (но с применением интегральных операционных усилителей первых поколений) позволяли получить верхнюю генерируемую частоту 1 МГц. Но и в этом случае приходилось использовать ряд схемотехнических приемов для получения сигналов с близкими к идеальным формами:

- температурную стабилизацию и компенсацию падений напряжения на открытых диодах ЭК;
- тщательный отбор интегральных операционных усилителей для реализации функций интегрирования;
- построение достаточно сложных схем преобразователей напряжения в напряжение и напряжения в ток;
- создание специальных преобразователей треугольного напряжения в синусоидальное с малым коэффициентом нелинейных искажений последнего;
- осуществление специальных мер по конструктивному исполнению генераторов и их экранировки как внешней, так и внутренней.

Трудности в построении функциональных генераторов многократно возрастали при увеличении максимальной частоты генерации с 1 до десятков МГц. Они стали по существу непреодолимыми, и лишь с разработкой новых поколений интегральных широкополосных усилителей и (особенно) специализированных интегральных микросхем функциональных генераторов появилась возможность создания действительно малогабаритных и легких устройств этого типа с максимальными частотами, достигающими десятков МГц.

3.1.5. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного

Формирование из треугольного сигнала синусоидального является одной из основных и самых трудных задач при построении функциональных генераторов. Простой ограничитель, типа показанного на рис. 3.2, создает заметно (даже на глаз) искаженное синусоидальное напряжение. Это связано с тем, что ограничение происходит по логарифмическому закону, который сильно отличается от синусоидального.

Намного лучшие результаты дает применение преобразователя на полевом транзисторе (рис. 3.6). Тут используется то обстоятельство, что начальный участок выходной ВАХ полевого транзистора похож на вид синусоидальной кривой в первом и третьем квадрантах. Однако и в этой схеме выходной сигнал не идеально синусоидальный и коэффициент гармоник доходит до долей процента лишь в тщательно оптимизированной и отрегулированной схеме, размещаемой в микротермостате [8].

Фактически формирователь может быть одноквadrантным, поскольку должен воспроизводить четверть периода синусоидальной функции (остальные четверти можно получить из первой четверти периода с помощью не очень сложных схем). Было

показано [8, 9], что для этого вполне подходят диодные 4–5-уровневые ограничители напряжения, которые широко использовались еще в старых аналоговых ЭВМ.

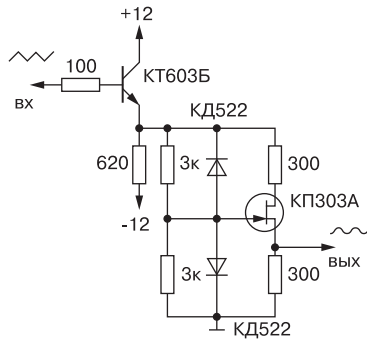


Рис. 3.6. Формирователь синусоидального сигнала из треугольного на полевом транзисторе

На рис. 3.7 показана схема 5-уровневого ограничителя треугольного сигнала, которая при тщательном подборе компонент может обеспечить значения K_T намного меньше 1%, вполне сравнимые с присущими RC-генераторам с инерционной обратной связью.

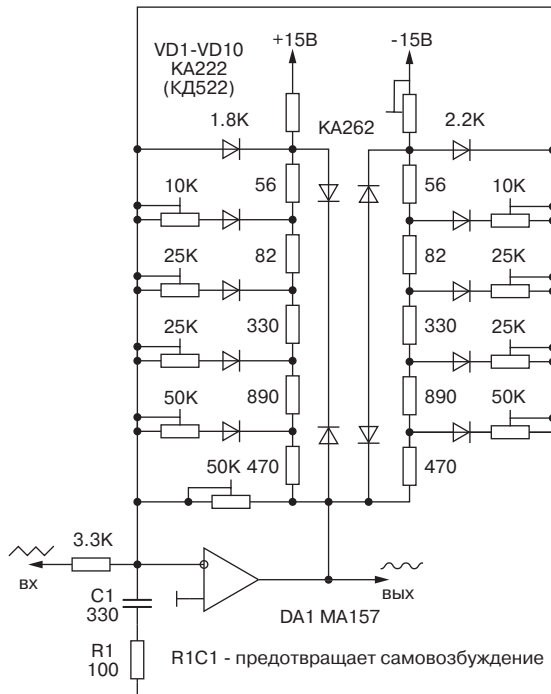


Рис. 3.7. Формирователь синусоидального сигнала из треугольного с 5-уровневым ограничителем

Подробное описание функциональных преобразователей и их проектирования можно найти в [59, 60]. Следует отметить, что даже в наши дни уровень развития нелинейных преобразователей не позволяет получить синусоидальное напряжение с коэффициентом гармоник много меньше 1% в достаточно широком диапазоне частот — от долей Гц до нескольких МГц.

3.2. Микросхема функционального генератора XR-2206

3.2.1. Назначение и вид микросхемы XR-2206

Широкому распространению функциональных генераторов в последние 10–15 лет способствовала разработка специализированных на их построение больших интегральных микросхем (БИС). Их применение не только удешевляет эти полезные приборы, но и позволяет достигнуть при их построении высоких технических характеристик. В частности, благодаря хорошо согласованным свойствам входящих в их состав полупроводниковых приборов и операционных усилителей.

К таким микросхемам относится *монолитная интегральная микросхема функционального генератора XR-2206*. Она служит для построения следующих устройств:

- функциональных генераторов;
- генераторов качающейся частоты;
- генераторов с амплитудной (АМ) и частотной (FM) модуляцией;
- преобразователей напряжения в частоту;
- генераторов с FSK модуляцией и др.

Основные особенности и параметры микросхемы:

- малый (до 0,5%) коэффициент нелинейных искажений синусоидального напряжения;
- высокая температурная стабильность частоты до 20 ppm/°C (или 0,02%/°C);
- широкий диапазон качания частоты до 2000/1;
- малая чувствительность к изменению напряжения питания;
- линейная амплитудная модуляция;
- TTL уровни управляющего напряжения при фазовой манипуляции (FSK);
- изменение несимметрии полувольт в широких пределах (от 1 до 99%);
- широкий диапазон возможных рабочих напряжений (от 10 до 26 В);
- умеренная потребляемая мощность (не более 750 мВт).

Вид корпуса микросхемы с обозначением номеров выводов показан на рис. 3.8. Микросхема выпускается в нескольких вариантах в зависимости от типа корпуса и рабочего диапазона температур окружающей среды.

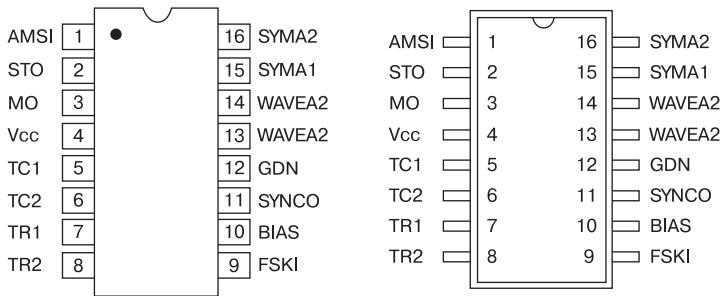


Рис. 3.8. Вид корпуса микросхемы XR-2206 (слева корпус PDIP, CDIP, справа SOIC)

3.2.2. Блок-схема и принципиальная схема микросхемы XR-2206

Упрощенная блок-схема микросхемы XR-2206 представлена на рис. 3.9. Микросхема содержит управляемый напряжением генератор импульсов VCO, переключатель тока Current Switches и блок множителей и формирования синусоидального или треугольного напряжения Multiplier And Sine Shaper.

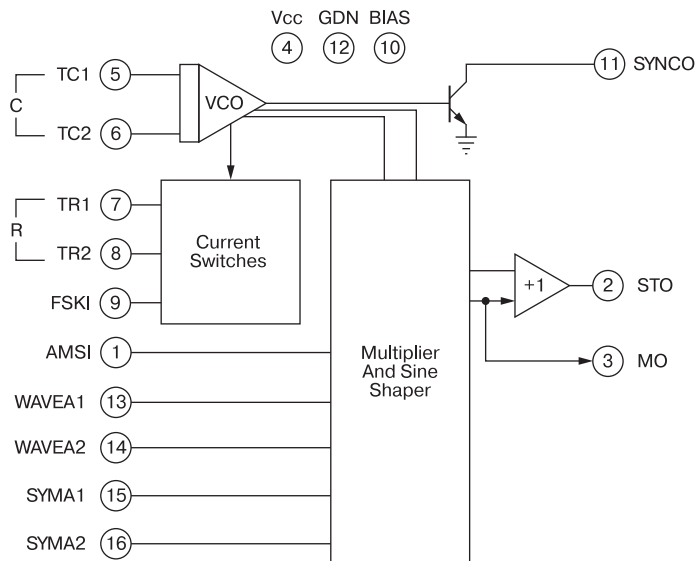


Рис. 3.9. Упрощенная блок-схема микросхемы XR-2206

Принципиальная схема микросхемы XR-2206 представлена на рис. 3.10. Как нетрудно заметить, большинство узлов микросхемы, которые нужны для создания функционального генератора среднего класса, построено на основе применения согласованных дифференциальных пар. Это позволяет добиться высокой температурной стабильности их работы без применения микроминиатюрных термостатов.

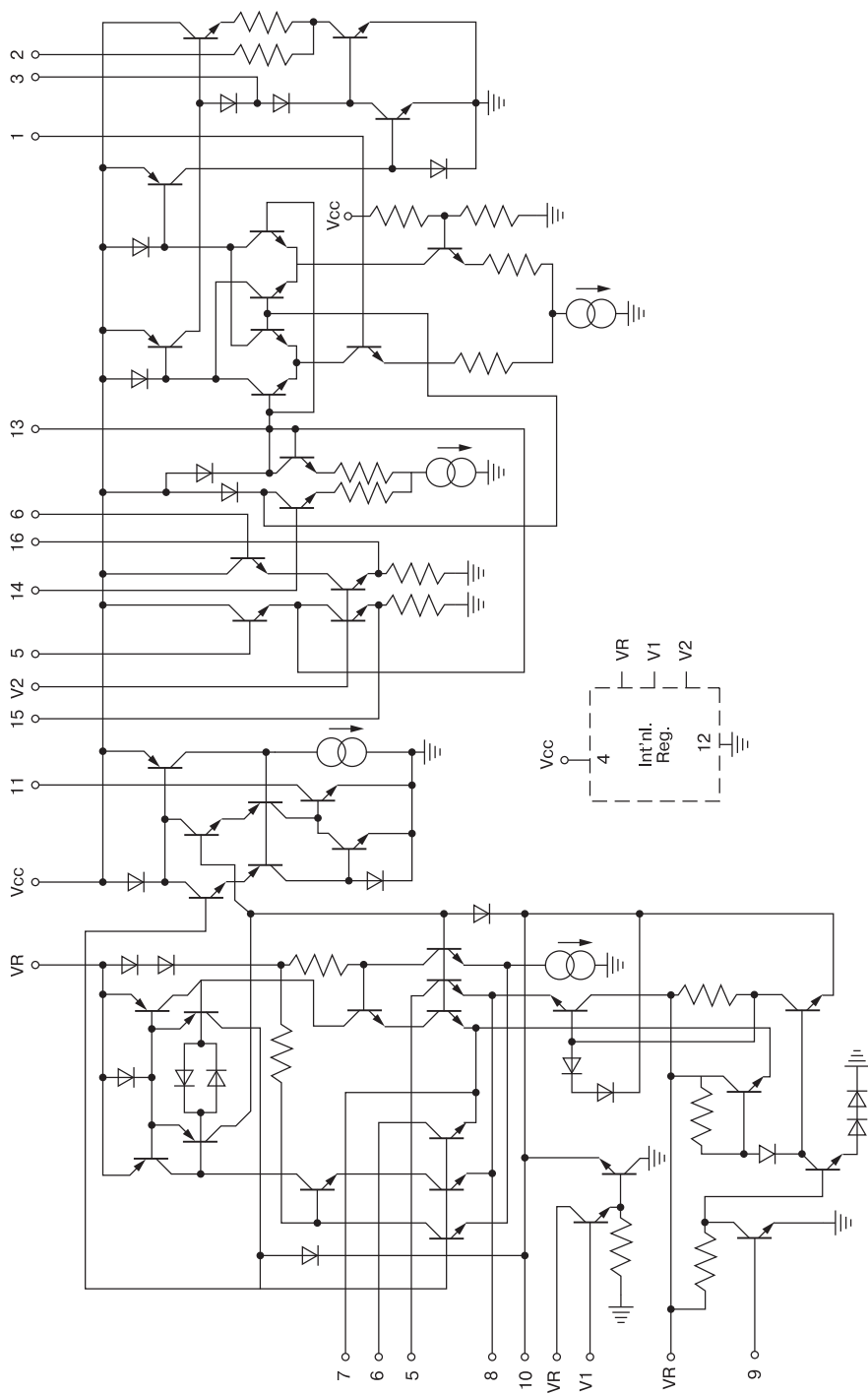


Рис. 3.10. Принципиальная схема микросхемы XR-2206

3.2.3. Назначение выводов микросхемы XR-2206

Ниже в таблице представлены номера выводов микросхемы, их обозначения и назначение каждого вывода.

<i>№ вывода</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Назначение</i>
1	AMSI	Вход сигнала амплитудной модуляции
2	STO	Выход синусоид. или треугольного сигнала
3	MO	Выход умножителя (Multiplier)
4	Vcc	Плюс напряжения питания
5	TC1	Подключение хранирующего конденсатора
6	TC2	Подключение хранирующего конденсатора
7	TR1	Подключение хранирующего резистора
8	TR2	Подключение хранирующего резистора
9	FSKI	Вход сдвига частоты
10	BIAS	Контроль внутреннего напряжения
11	SYNCO	Выход синхронизации (с открытым коллектором)
12	GND	Земля
13	WAVEA1	Вход регулировки формы сигнала 1
14	WAVEA2	Вход регулировки формы сигнала 2
15	SYMA1	Вход регулировки симметрии сигнала 1
16	SYMA2	Вход регулировки симметрии сигнала 2

3.2.4. Типовая схема применения микросхемы XR-2206

На рис. 3.11 представлена рекомендуемая разработчиком типовая схема применения микросхемы XR-2206.

С помощью резистора R3, подключенного к выводу 3 микросхемы, можно осуществлять плавную регулировку амплитуды треугольных импульсов или синусоидального напряжения. Их зависимость от значения R3 представлена на рис. 3.12.

На рис. 3.13 показана зависимость потребляемого микросхемой тока от напряжения питания при различных значениях сопротивления R. Нетрудно заметить, что минимальное R определяется ростом потребляемой микросхемой мощности при уменьшении R. Типичное минимальное значение R около 1 кОм. Максимальное значение R может достигать 2 МОм, так что пределы изменения R (и временных параметров) могут достигать 2 000 раз.

Микросхема XR-2206 позволяет получать довольно малые нелинейные искажения синусоидального сигнала вплоть до частот около 100 кГц (рис. 3.14). Наименьший коэффициент гармоник (около 0,5%) реализуется при R около 30 кОм. С ростом и уменьшением значения R коэффициент гармоник возрастает.

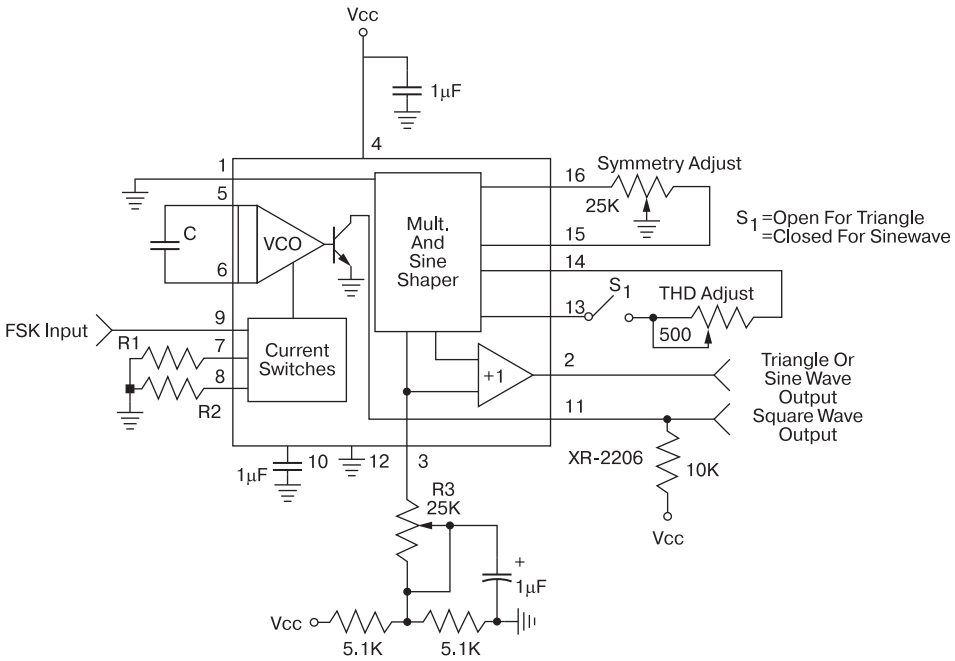


Рис. 3.11. Типовая схема применения микросхемы XR-2206

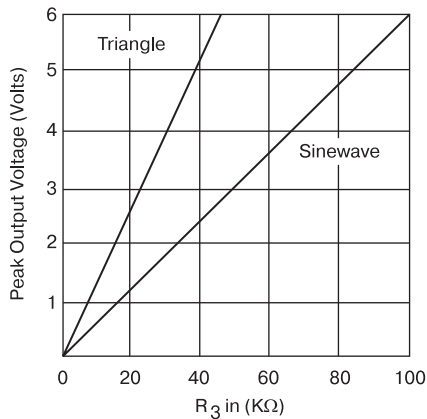


Рис. 3.12. Зависимость амплитуды треугольных импульсов и синусоидального напряжения от величины резистора R₃

Важное значение имеет температурная стабильность параметров функциональных генераторов. Изменение частоты генераторов на основе микросхемы XR-2206 с изменением температуры окружающей среды показано на рис. 3.15 для разных значений R.

Рис. 3.13. Зависимость потребляемого микросхемой XR-2206 тока от напряжения питания при разных значениях R

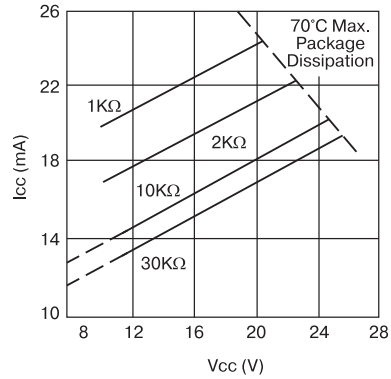


Рис. 3.14. Зависимость коэффициента гармоник синусоидального напряжения от частоты

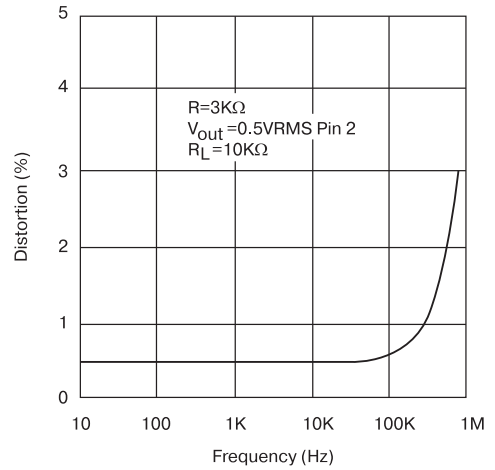
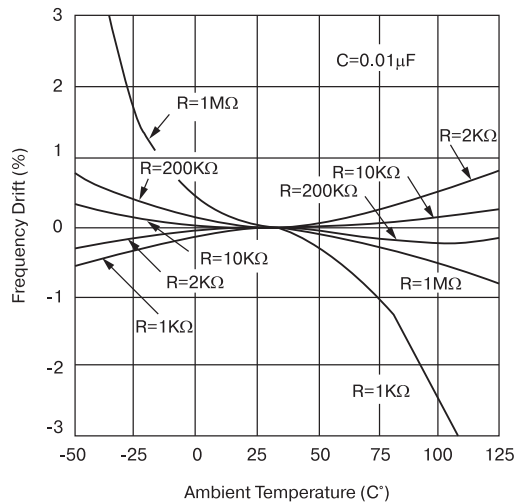


Рис. 3.15. Изменение частоты при изменении температуры для схемы генератора с рис. 3.11 при различных R



3.3. Микросхема функционального генератора MAX038

3.3.1. Назначение и вид микросхемы MAX038

Примером высококачественной микросхемы функционального генератора является микросхема MAX038 фирмы MAXIM [58]. Вид на ее корпус сверху представлен на рис. 3.16. Микросхема выполнена в корпусе с 20 выводами и содержит все блоки типичного функционального генератора, включая преобразователь треугольного сигнала в синусоидальный.

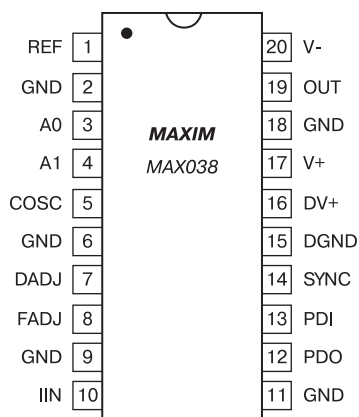


Рис. 3.16. Микросхема MAX038 фирмы MAXIM (вид сверху)

3.3.2. Функциональная схема микросхемы MAX038

Функциональная схема микросхемы MAX038 показана на рис. 3.17. Центральное место занимает собственно генератор OSCILLATOR, работа которого основана на заряде и разряде внешней емкости C регулируемым постоянным током. Для этого служит источник регулируемого тока OSCILLATOR CURRENT GENERATOR. Такое решение обеспечивает заземление одной из обкладок обычно переключаемого конденсатора и позволяет в широких пределах плавно менять частоту генератора изменением управляющего напряжения. Кроме того, при этом обеспечена возможность регулировки симметрии (скважности) импульсов и манипуляции.

Применение интегратора на основе управляемых источников тока имеет некоторые преимущества перед интегратором с емкостной отрицательной обратной связью — более высокие частоты и меньшие искажения вершин треугольных колебаний. Правда, получение высокой линейности треугольного напряжения оказывается более сложной задачей.

Для получения синусоидального напряжения применен преобразователь SINE SHAPER, а для получения прямоугольного напряжения — дополнительный компара-

тор COMPARATOR. Коммутатор MUX служит для выбора формы сигнала (синусоидальной, треугольной или прямоугольной), а буферный усилитель для подключения нагрузки $R_L C_L$. Второй компаратор и фазовый детектор PHASE DETECTOR служат для создания сигналов синхронизации, которые используются осциллографом при работе с функциональным генератором.

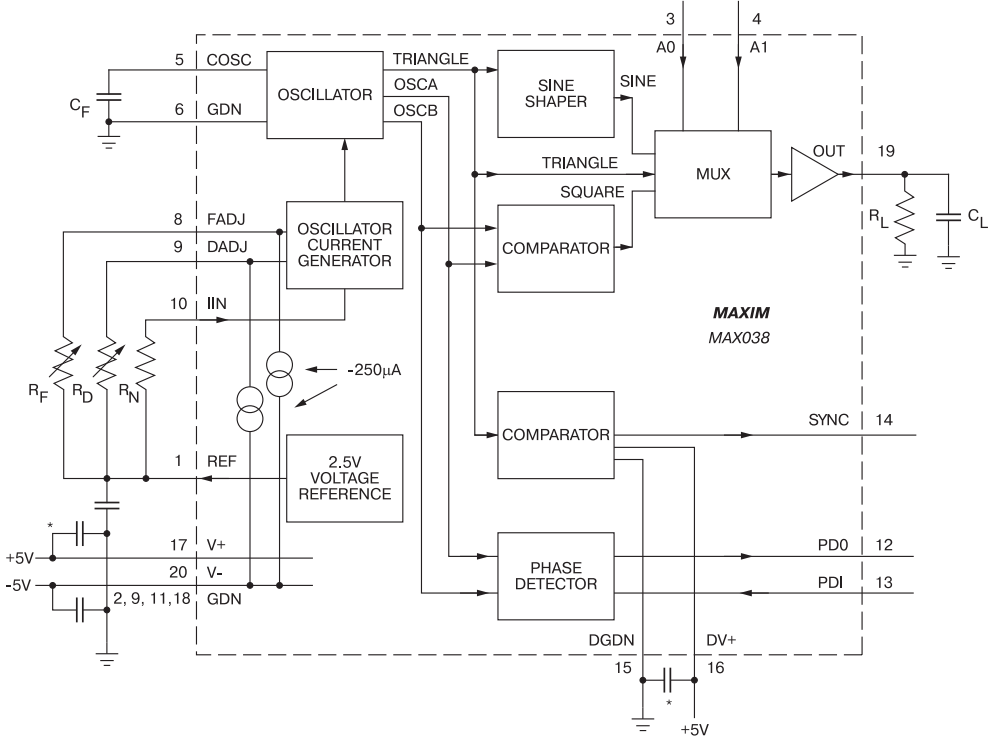


Рис. 3.17. Функциональная схема микросхемы MAX038

3.3.3. Основные схемы включения микросхемы MAX038

На рис. 3.18 представлены рекомендованные разработчиком типовые схемы включения этой микросхемы: слева обычная и справа с несколькими улучшенными характеристиками (показаны только изменения в основной схеме).

3.3.4. Осциллограммы и спектры сигналов микросхемы MAX038

На рис. 3.19 представлены полученные широкополосным осциллографом осциллограммы сигналов функционального генератора на данной микросхеме: слева на частоте 50 Гц, а справа на предельной частоте 20 МГц. Нетрудно заметить, что на низкой

частоте форма сигналов безупречна, а вот на частоте 20 МГц искажения сигнала заметны даже на глаз. Тут, однако, уместно отметить, что функциональные генераторы со столь высокой частотой довольно редкие приборы. Так что микросхема MAX038 пригодна практически для всех массовых моделей функциональных генераторов.

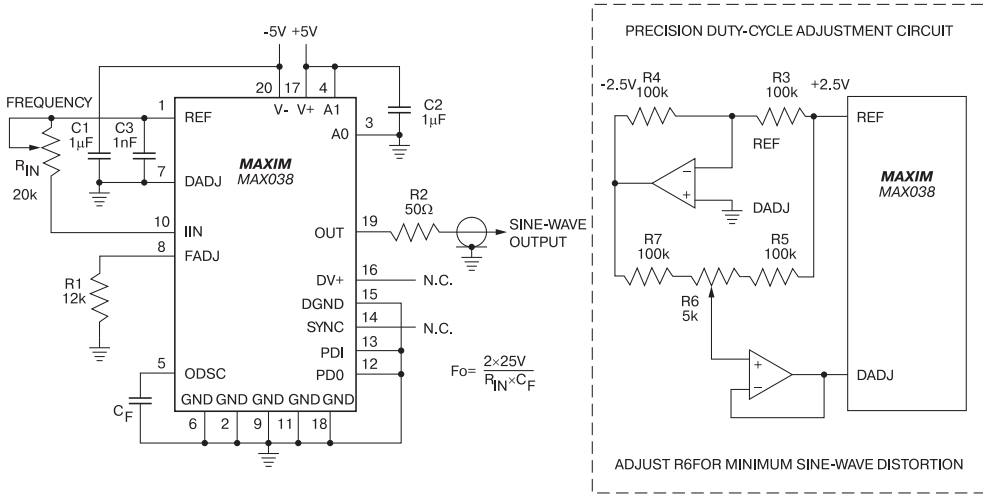


Рис. 3.18. Обычная и улучшенная схемы включения микросхемы MAX038 фирмы MAXIM

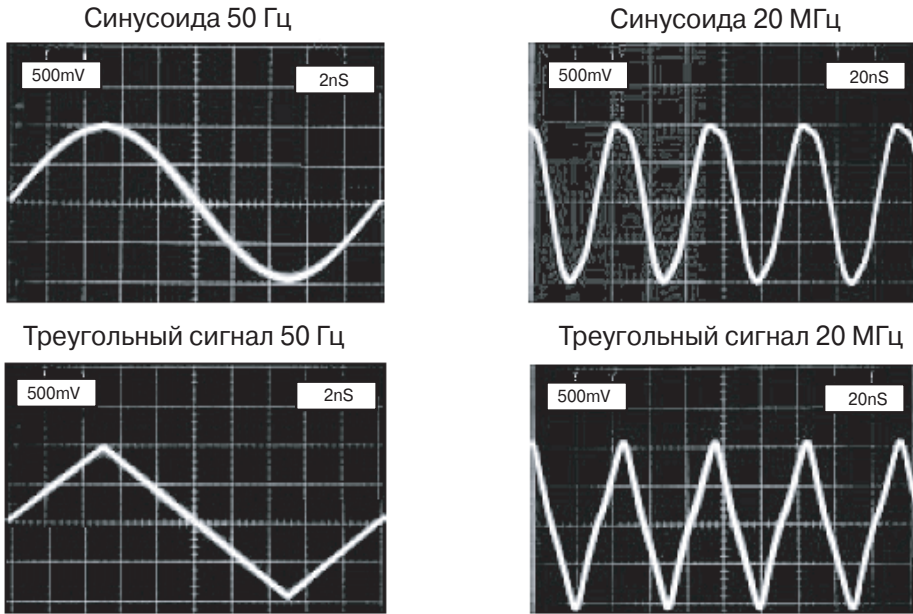


Рис. 3.19. Осциллограммы сигналов функционального генератора MAX038 на частоте 50 Гц (слева) и 20 МГц (справа)

Осциллограммы рис. 3.20 дают представление и о других возможностях микросхемы, в частности, о влиянии емкости нагрузки на форму импульсов прямоугольной формы, о возможности манипуляции и частотной модуляции выходного сигнала.

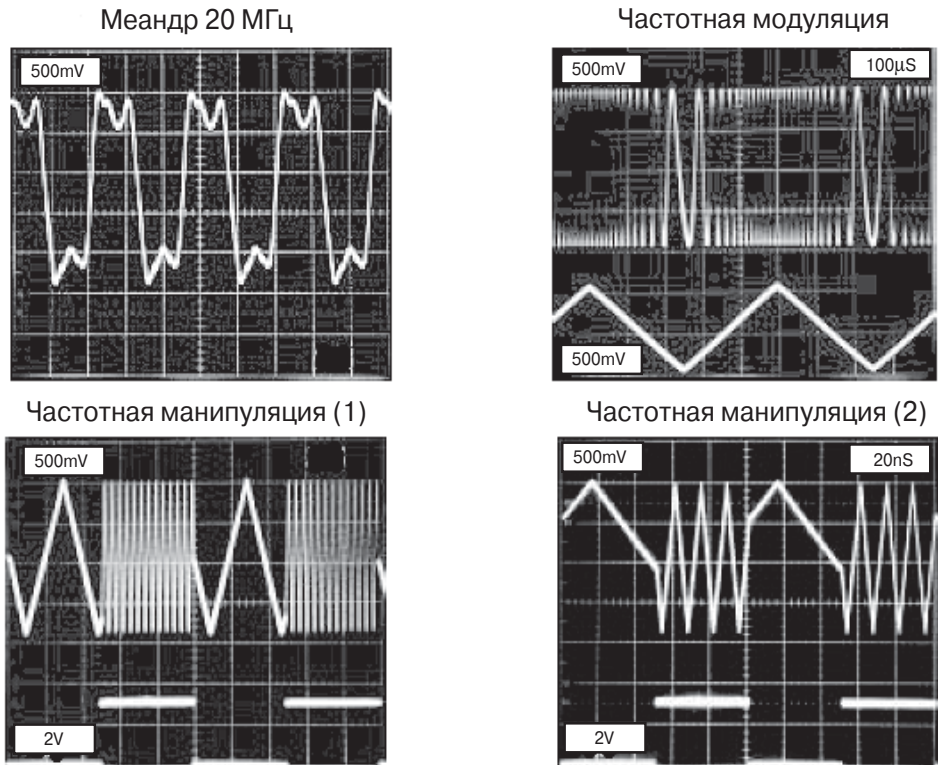


Рис. 3.20. Осциллограммы, иллюстрирующие возможности микросхемы MAX038

Специалистам о качестве сигналов генераторов лучше всего говорят спектры сигналов. На рис. 3.21 представлены спектры двух сигналов — прямоугольного (слева) и синусоидального (справа). К примеру, из них видно, что уровень второй гармоники синусоидального сигнала с частотой 5,9 кГц на 50 дБ (почти в 300 раз) ниже уровня первой гармоники. Напротив, прямоугольный сигнал дает четко выраженные гармоники (особенно нечетные).

3.4. Серийные аналоговые функциональные генераторы

Наша и особенно зарубежная промышленность ныне выпускает множество аналоговых функциональных генераторов. Мы рассмотрим наиболее доступные из них. К сожалению

нию, ныне положение таково, что более доступными на нашем рынке стали зарубежные генераторы этого типа. Ничего обидного в этом нет — таковы законы конкуренции. Элементная база за рубежом более обширна и дешева, а потому и производство функциональных генераторов обходится дешевле.

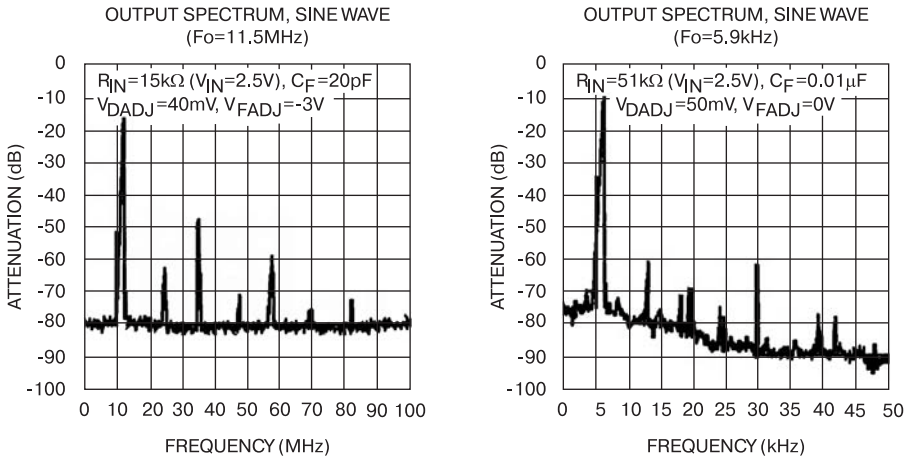


Рис. 3.21. *Спектрограммы прямоугольного (слева) и синусоидального (справа) сигналов функционального генератора MAX038*

3.4.1. Функциональные генераторы времен СССР

В СССР велись серьезные разработки функциональных генераторов на основе интегральных операционных усилителей первых поколений и элементной базы на дискретных приборах (прежде всего, транзисторах и диодах). Уровень этих разработок достаточно полно отражен в книге [8].

Серийно выпускался ряд функциональных генераторов: Г6-27, Г6-28, Г6-29, Г6-31. Все приборы генерировали синусоидальное, треугольное и импульсное напряжение с частотами от 0,001 Гц до 1 МГц. Лишь простой генератор Г6-27 имел массу 6,5 кг, остальные приборы имели массу 12, 12,5 и 17 кг. Они предназначались для встраивания в стойки с шириной 490 мм.

Выпускался также модуль функционального генератора Я7Г-74 для малогабаритной (по тем временам) измерительной системы. Этот прибор не имел защитного корпуса и встроенного источника питания. За счет этого масса прибора была невелика — 2,5 кг.

Наивысшие технические характеристики имел функциональный генератор Г6-34, обеспечивающий частотный диапазон сигналов от 0,001 Гц до 10 МГц. Прибор имел электронное управление и достаточно обширные функциональные возможности, в частности, обеспечение генерации ассиметричных колебаний, частотную и амплитудную их модуляцию. Однако габариты прибора 490×135×180 мм были велики, а масса достигала 13 кг.

Все эти приборы уже не выпускаются, поэтому ограничимся приведенными выше их характеристиками. Более подробные характеристики этих приборов и обзор 85 примеров их применения можно найти в [8]. Следует отметить, что некоторые фирмы, торгующие складскими запасами советских радиоизмерительных приборов, до сих пор предлагают эти приборы по достаточно умеренным ценам.

3.4.2. Функциональные генераторы фирмы МНИПИ

Минский научно-исследовательский и приборостроительный институт (ОАО МНИПИ) достойно продолжает традиции советских разработчиков измерительной аппаратуры, которая хорошо представлена в наши дни на российском рынке. МНИПИ разработал и выпускает на рынок несколько моделей генераторов. Среди них есть модель наиболее простого функционального генератора Г6-43. Внешний вид прибора представлен на рис. 3.22.

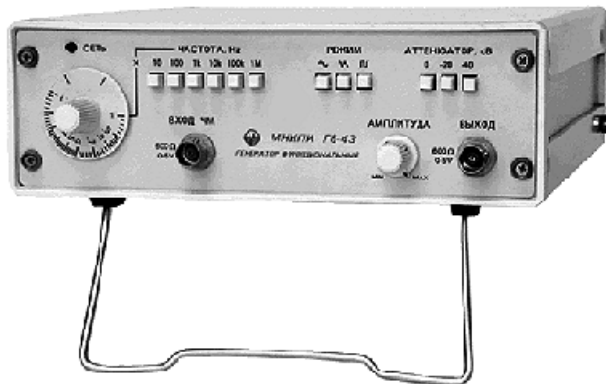


Рис. 3.22. Внешний вид функционального генератора Г6-43

Функциональный генератор Г6-43 имеет следующие характеристики:

- Диапазон частот 1 Гц — 1 МГц.
- Формы сигналов: синус, треугольник, прямоугольник.
- Нестабильность частоты 0,5% — за 15 мин.
- Размах сигнала ≥ 20 В (без нагрузки); ≥ 10 В (600 Ом).
- Коэффициент гармоник: (синус) $\leq 5\%$ (10 Гц — 100 кГц).
- Выброс, фронт импульсов: $\leq 5\%$, ≤ 150 нс.
- Ассиметрия импульсов: $\leq 5\%$.
- Нелинейность треугольника: $\leq 1.5\%$ (1–100 Гц).
- Внешняя ЧМ-модуляция.
- Плавное и ступенчатое ослабление сигнала.

Как нетрудно заметить, прибор имеет достаточно скромные характеристики. Генератор сигналов функциональный Г6-46 имеет дополнительно возможность генерации пилообразного напряжения. Внешний вид генератора представлен на рис. 3.23.



Рис. 3.23. Внешний вид функционального генератора Г6-46

Характеристики функционального генератора Г6-46 представлены ниже:

- Диапазон частот 0,1 Гц — 1 МГц.
- Формы сигналов: синус, треугольник, прямоугольник, пила.
- Дополнительный выход синхросигнала ТТЛ.
- 7 поддиапазонов, цифровой индикатор частоты.
- Погрешность установки частоты $\pm 1\%$.
- Нестабильность частоты 0,5% — за 15 мин.
- Размах сигнала ≥ 20 В (без нагрузки); ≥ 10 В (600 Ом).
- Коэффициент гармоник: $\leq 5\%$ (10 Гц — 100 кГц).
- Выброс, фронт импульсов: $\leq 5\%$, ≤ 100 нс.
- Нелинейность треугольника, пилы: $\leq 1,5\%$ (1 — 100 Гц).
- Внешняя ЧМ-модуляция.
- Плавное и ступенчатое ослабление сигнала.

Все приборы выполнены в стандартном малогабаритном корпусе, имеющем следующие габариты: 71×210×248 мм и массу 2 кг. Питание приборов от сети ~ 220 В, потребляемая мощность 10 Вт.

МНИПИ относит к функциональным генераторам и свои приборы Г4-221 и Г4-221/1. Внешний вид генератора Г4-121 представлен на рис. 3.24.

Основные технические характеристики генераторов Г4-121:

- Форма сигналов: синусоидальная, немодулированный и амплитудно-модулированный сигнал, меандр и импульс ТТЛ.
- Диапазоны частот сигналов: 10^{-1} — $1,7 \cdot 10^7$ Гц.



Рис. 3.24. Внешний вид генератора Г4-121

- Амплитуда "меандра" на нагрузке 50 Ом — 7 В (двойной размах — 14 В).
- Погрешность установки размаха сигнала — $\pm 0,5$ В.
- Ступенчатое ослабление выходного сигнала: -20, -40, -60 дБ.
- Плавное ослабление выходного сигнала ≥ 40 дБ.
- Коэффициент гармоник (для синусоидального сигнала с частотой от 10 Гц до 120 кГц) — $\leq 0,2\%$.
- Амплитудная модуляция (внутренним сигналом) с частотой 1 000 Гц.
- Коэффициент амплитудной модуляции: 0–90 %.
- Напряжение питания — 220 В, 50 Гц, потребляемая мощность 40 ВА.
- Габаритные размеры: 127×306×345 мм.
- Масса — 4,5 кг.

Генераторы Г4-121/1 (рис. 3.25) похожи внешне на приборы Г4-121. Однако они имеют дополнительный выход меандра с повышенной амплитудой и дополнительный регулятор уровня по этому выходу. Двойная амплитуда меандра на дополнительном выходе достигает 80 В, а амплитуда меандра и синусоидального сигнала на дополнительном выходе при нагрузке 1 кОм достигает 30 В. Погрешность установки размаха меандра $\leq \pm 0,5$ В. Дискретность установки частоты — 0,1 Гц. Амплитудная модуляция внешним сигналом возможна в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц. Остальные параметры Г4-121/1 аналогичны параметрам генератора Г4-121.

3.4.3. Функциональные генераторы фирмы Wavetek Meterman

Прибор FG2CE фирмы Wavetek Meterman (рис. 3.26) представляет собой типичную "бюджетную" модель функционального генератора для широкого применения. Диапазон частот генератора от 0,3 Гц до 3 МГц перекрывается 7 поддиапазонами. Плавное

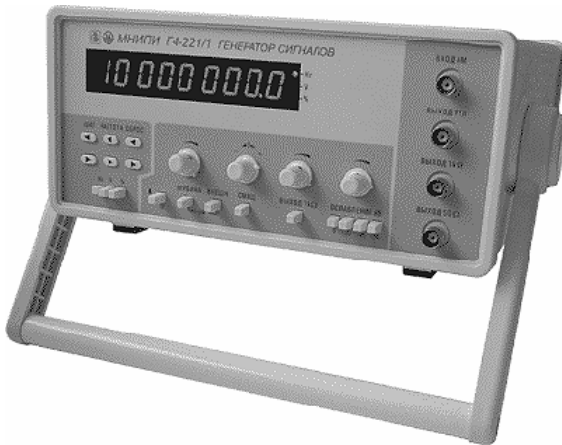


Рис. 3.25. Внешний вид генератора Г4-121/1

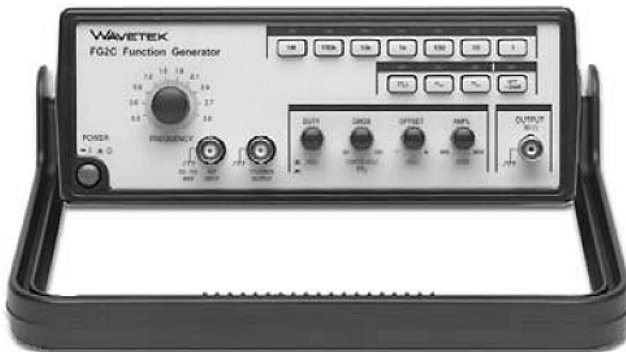


Рис. 3.26. Функциональный генератор FG2CE фирмы Wavetek Metertan

изменение частоты в чуть более 20 раз осуществляется ручкой с лимбом. Прибор вырабатывает следующие виды сигналов: синусоидальный (коэффициент гармоник менее 1% на частотах до 200 кГц), треугольный, прямоугольный, TTL и CMOS. Возможна перестройка частоты (до 1:100) с помощью внешнего напряжения от 0 до 10 В. Габариты прибора 292×143×93 мм, масса 2 кг.

Поскольку частота является важным параметром любого измерительного генератора, то разумно объединение функционального генератора с простым цифровым частотомером. Это и сделано в приборе FG3CE (рис. 3.27). Этот прибор построен на основе ранее описанной модели и имеет идентичные с ней параметры функционального генератора. Цифровой электронный частотомер прибора построен по счетному принципу и имеет индикатор с 6 разрядами. Диапазоны частот 0,3 Гц — 3 МГц для контроля частоты и от 5 Гц до 150 МГц на внешнем входе. Габариты и масса прибора аналогичны приведенным выше для прибора FG2CE.



Рис. 3.27. Функциональный генератор FG3CE с встроенным цифровым частотомером

3.4.4. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы METEX

Южнокорейская компания METEX получила известность на нашем рынке своими "бюджетными" измерительными приборами и комплексами, например, настольными и портативными мультиметрами и портативными осциллографами. Выпускает она и комбинированные измерительные приборы, имеющие широкие возможности в выполнении разнообразных измерений в сочетании с вполне умеренной ценой. Они прекрасно подходят для служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, исследовательских лабораторий и даже для радиолюбителей. Приборы этой фирмы реализуют магазины сети "Чип и Дип" и компания "Платан" [128].

Функциональные генераторы и цифровые частотомеры MSG-9802A/9810A/9816A (рис. 3.28) отличаются только диапазонами частот функционального генератора. У MSG-9802A он составляет от 0,2 Гц до 2 МГц, у MSG-9810A от 1 Гц до 10 МГц, а у MSG-9816A от 1 Гц до 16 МГц. Этот диапазон разбит на 7 поддиапазонов, выбираемых кнопками под цифровым индикатором. Функциональный генератор генерирует сигналы синусоидальной формы, прямоугольные (меандр) и треугольные. Выбор



Рис. 3.28. Функциональный генератор и цифровой частотомер MSG-9810A

формы сигналов также осуществляется кнопками. Размеры прибора 213×80×260 мм (у MSG-9802A 280×213×110 мм).

Функциональный генератор позволяет добавлять к этим сигналам постоянную составляющую и менять соотношение времен нарастания и спада сигналов. Все это позволяет получать множество форм сигналов, нужных для тестирования электронных устройств и проведения их исследования.

Управление генераторами удобное и осуществляется с помощью кнопок и переменных резисторов со своими переключателями (выдвигаемые ручки). Частота сигналов меняется с помощью многооборотного резистора, оснащенного ручкой с верньером и шкалой. Это позволяет достаточно точно устанавливать нужную частоту. Сама шкала имеет чисто символический характер, и контроль частоты осуществляется цифровым частотомером. Поскольку функциональный генератор аналоговый, то искажения формы сигналов, связанные с дискретизацией, отсутствуют.

Была практически оценена работа функционального генератора MSG-9810A. Учитывая довольно высокие частоты (до 10 и даже 16 МГц) сигналов, для этого применялся цифровой широкополосный (250 МГц) осциллограф DS-1250 фирмы EZ Digital, подключенный по USB-интерфейсу к компьютеру. Применение такого комплекса позволяет не только наблюдать форму сигналов испытуемого генератора без искажений, но и получить в цифровой форме данные о десятке параметров сигналов по двум каналам.

На рис. 3.29 показано окно с осциллограммами синусоидального и TTL сигналов на частоте генератора, равной 1 МГц. На синусоиде слабо видны признаки ее дискретизации цифровым осциллографом. Но в целом форма синусоиды весьма близка к идеальной (коэффициент гармоник нормируется на уровне менее 1% на частоте 1 кГц). Неплохо выглядит и TTL сигнал. Данные измерений различных амплитудных и временных параметров представлены внизу окна.

На рис. 3.30 и 3.31 показаны осциллограммы треугольного и прямоугольного сигналов на той же частоте. Можно сделать вывод о вполне хорошей форме сигналов на частотах порядка 1 МГц. Это оправдывает наличие "низкочастотной" модели MSG-9802A, у которой нижняя граничная частота равна 0,1 Гц и гарантируется хорошая форма сигналов до предельной частоты в 2 МГц.

Максимальные частоты даже куда более дорогих функциональных генераторов других фирм редко превосходят 3–5 МГц. Поэтому, как немаловажное достоинство приборов фирмы METEX MSG-9810A и MSG-9816A, можно отметить максимальные частоты сигналов в 10 и даже 16 МГц. Это резко расширяет их возможности в тестировании и наладке современных импульсных, радиоприемных и иных устройств.

Разумеется, ждать идеальной формы сигналов на таких частотах не приходится. Это подтверждают осциллограммы на рис. 3.32 для генератора MSG-9810A для его предельной частоты в 10 МГц. Тем не менее, нетрудно заметить, что даже на этой частоте треугольный сигнал имеет удовлетворительную форму со слегка скругленными верхушками. Форма прямоугольных импульсов, увы, далека от идеальной, как на TTL, так и на основном выходе. Для ее улучшения рекомендуется подключать к выходу согласованную нагрузку в 50 Ом.

Как уже отмечалось, у генераторов есть возможность регулировки асимметрии сигналов — отношение длительности полупериодов примерно от 1/3 до 3/1 и более

(рис. 3.33). Введение асимметрии позволяет получать линейно-нарастающие и линейно-спадающие сигналы, а также сигналы прямоугольной формы со скважностью, заметно отличающейся от 2 (это значение характерно для меандра). Это также расширяет области применения прибора, например, позволяет использовать его в качестве генераторов развертки и запускающих импульсов.

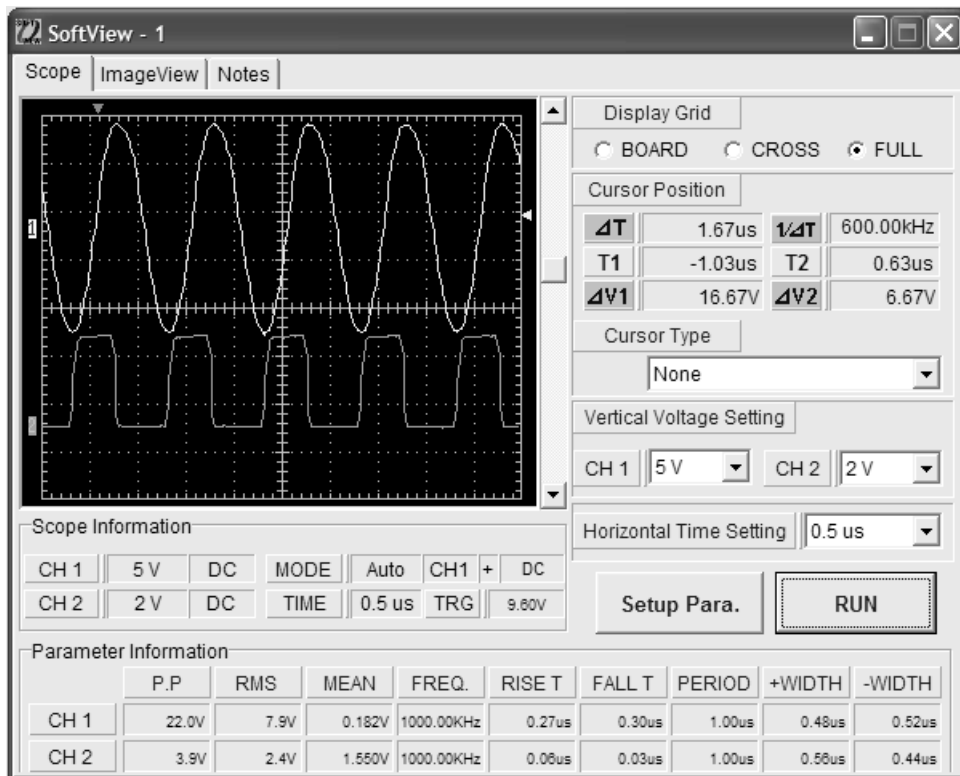


Рис. 3.29. Окно с осциллограммами синусоидального и TTL сигналов на частоте 1 МГц

Наряду с основным выходом OUT (амплитуда сигнала 20 В без нагрузки и 10 В на согласованной нагрузке 50 Ом) предусмотрен выход TTL для несимметричных почти прямоугольных импульсов с параметрами, характерными для TTL микросхем. При выдвигании ручки регулировки амплитуды включается аттенюатор, ослабляющий сигнал в 10 раз (20 дБ).

Для точного контроля частоты сигналов функционального генератора необходим цифровой частотомер. Поэтому вполне естественно объединение в одном приборе серии MSG функционального генератора и цифрового частотомера. Частотомер описываемых приборов имеет два канала. Канал А обеспечивает измерение частот до 20 МГц с высокоомным входом (1 МОм, максимальное напряжение от пика до пика 35 В), а канал В частот от 20 МГц до 2,7 ГГц на 50-омном входе (максимальное напряжение от

пика до пика 3 В). Измерение частот производится подсчетом числа периодов сигналов в интервалах времени 0,1, 1 и 10 секунд. Это соответствует разрешению по частоте 10, 1 и 0,1 Гц. Результаты измерения частоты сигналов или функционального генератора отображаются на 8-разрядном цифровом индикаторе (с белым или красным цветом цифр). Для канала А предусмотрена возможность подачи сигнала с выхода функционального генератора (для контроля его частоты) или с входа СН-А.



Рис. 3.30. Осциллограммы прямоугольного и TTL сигналов на частоте 1 МГц

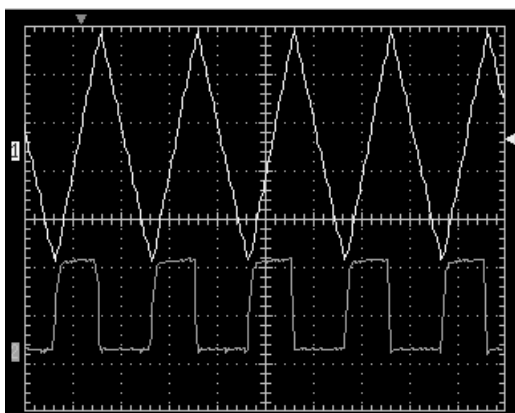


Рис. 3.31. Осциллограммы треугольного и TTL сигналов на частоте 1 МГц

3.4.5. Программа стыковки приборов METEX с компьютером

Для своих мультиметров и частотомеров, в том числе входящих в комбинированные приборы, компания METEX поставляет программу BenchView, которая позволяет вводить данные измерений частоты в компьютер и отображать их в табличной и графической форме. Разумеется, это возможно после подключения приборов к компью-

теру с помощью прилагаемого интерфейсного RS-232 кабеля и после установки программного обеспечения с дискеты.

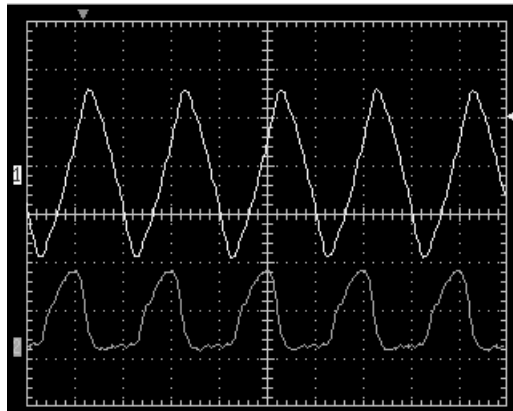


Рис. 3.32. Осциллограммы треугольного и TTL сигналов на частоте 10 МГц

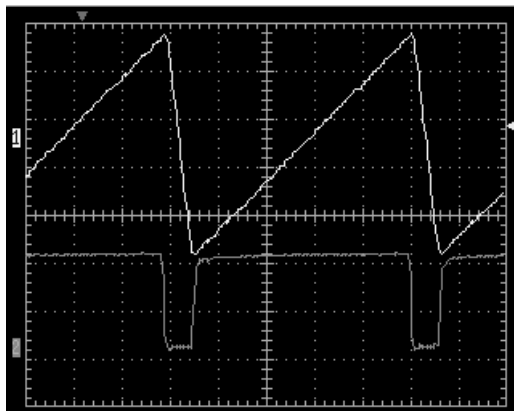


Рис. 3.33. Осциллограммы треугольного и TTL сигналов на частоте 1 МГц с максимальной асимметрией

На рис. 3.34 представлено основное окно программы при работе с цифровым частотомером приборов серии MSG. Работа с окном вполне очевидна, как и назначение деталей его интерфейса пользователя.

В позиции WindowScale меню программы можно задать или убрать вывод того или иного частичного окна. Для примера на рис. 3.35 представлено окно графика. Оно позволяет наблюдать график зависимости частоты от времени, подобный показанному на рис. 3.34 в укрупненном виде. В этом окне можно поменять пределы отображаемых частот и подтвердить это активизацией кнопки Range Change. В правой части сверху окна на рис. 10 можно задать интервал времени измерений и интервал их повторений (по умолчанию 1 с).

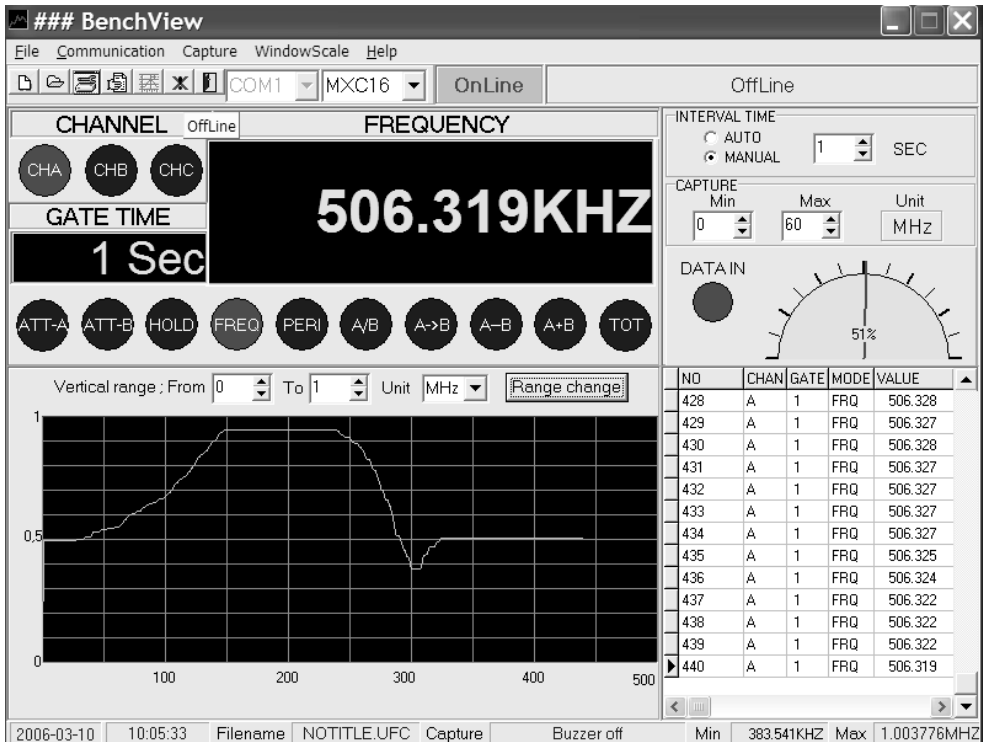


Рис. 3.34. Основное окно программы BenchView при работе с цифровым частотомером приборов серии MSG

3.4.6. Измерительные комплексы MS-9160/9170 фирмы METEX

Компания METEX выпускает также измерительные комплексы MS-9150, MS-9160 и MS-9170. Эти приборы объединяют в одном корпусе сразу 4 прибора: аналоговый функциональный генератор, цифровой частотомер, универсальный цифровой мультиметр и трехканальный источник питания. Варианты оформления приборов (с темной и светлой передними панелями) представлены на рис. 3.36.

Нельзя не отметить, что стоимость комплекса заметно ниже стоимости отдельно приобретаемых приборов, аналогичных по параметрам. Таким образом, приобретение комплексов экономит не только место на рабочем столе пользователя, но и его средства.

Мультиметр комплексов имеет свой дисплей, служит для измерения следующих параметров электрических сигналов:

- Дисплей 3 $\frac{3}{4}$ разряда (максимальное показание 3999) + дополнительный дисплей + линейная шкала (у MS-9170 дисплей 5 $\frac{3}{4}$ разряда).
- Режим "Data hold" (сохранение данных на дисплее).

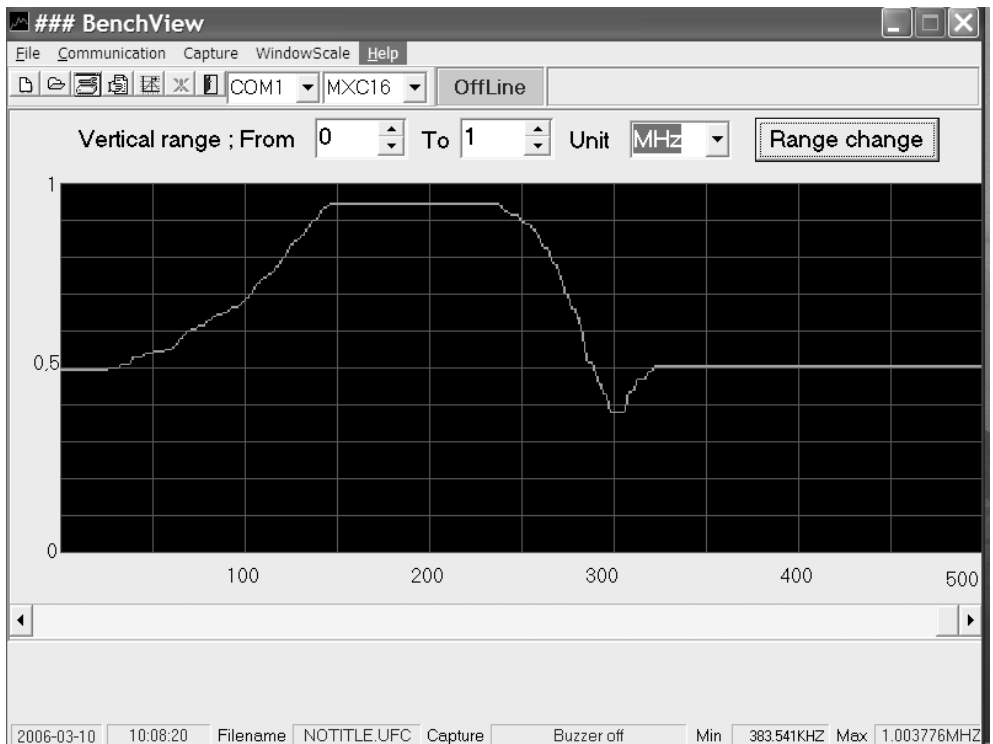


Рис. 3.35. Окно графика зависимости частоты от номера отсчета (времени)

- Диапазоны измерения постоянного напряжения: DCV 400 мВ — 4 — 40 — 400 — 1000 В.
- Диапазоны измерения переменного напряжения: ACV 400 мВ — 4 — 40 — 400 — 750 В.
- Диапазоны измерения постоянного тока: DCI 4 — 40 — 400 мА — 4 А, 20 А.
- Диапазоны измерения переменного тока: ACI 4 — 40 — 400 мА — 4 А — 20 А.
- Диапазоны измерения сопротивления: 200 Ом — 4 — 40 — 400 кОм — 4 — 40 МОм.
- Измерение индуктивности: 40–400 мГн (только у MS-9160).
- Тест диодов и транзисторов — есть (только у MS-9150).
- Режим прозвона цепей на проводимость со звуковым сигналом < 40 Ом — есть (только у MS-9150).
- Питание: от внутреннего источника.

Функциональный генератор и частотомер у этих приборов совершенно аналогичны примененным в приборах серии MSG и описанным выше. Аналогично и применяемое программное обеспечение.

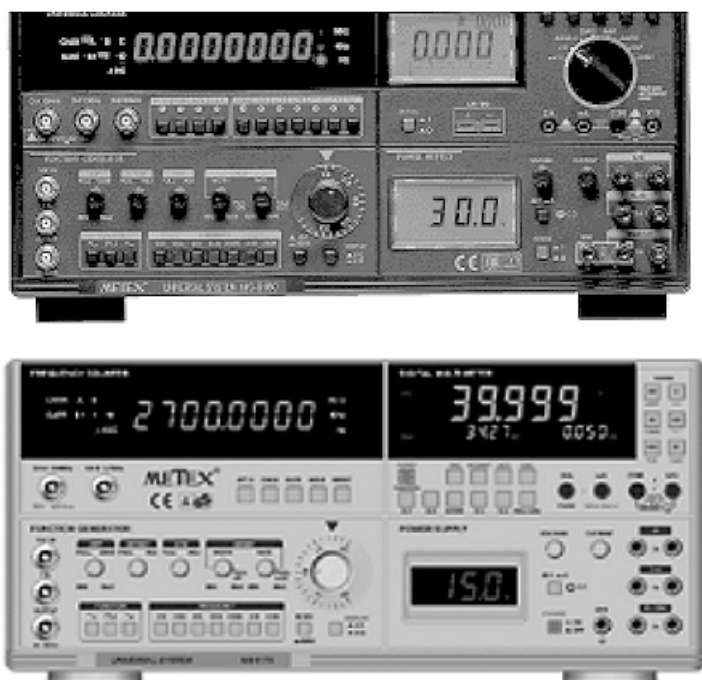


Рис. 3.36. Измерительные комплексы серии MS фирмы METEX

Стоимость измерительных комплексов от 17 до 20 тысяч рублей. Это заметно меньше, чем стоимость отдельно приобретаемых приборов, входящих в комплекс. Масса комплекса довольно большая — 15 кг, что связано с включением в него лабораторных источников питания. Размеры приборов 375×370×165 мм.

Приборы не лишены недостатков. Так, в функциональных генераторах нет выхода развертки, управляющей качанием частоты, что усложняет построение на них измерителей АЧХ. Достаточно сложна точная установка частоты по показаниям цифрового частотомера. Приведенные в инструкциях параметры приборов не дают полного представления об их возможностях и конкретных значениях параметров. Прилагаемое программное обеспечение примитивно и явно недоработано. В связи с этим некоторые возможности приборов (например, компьютерная обработка результатов вычислений) остаются не полностью реализованными.

3.4.7. Функциональные генераторы MFG-82**А фирмы MATRIX

Фирма MATRIX выпускает серию аналоговых функциональных генераторов. Это сравнительно дешевые приборы с умеренными техническими характеристиками. Базовой моделью является генератор MFG-8215A, внешний вид которого представлен на рис. 3.37. Заданный общий диапазон частот перекрывается ручкой плавного изме-

нения частоты и кнопками, переключающими диапазоны частот. Отношение максимальной частоты к минимальной составляет миллион раз!



Рис. 3.37. Внешний вид функционального генератора MFG-8215A

Технические данные функционального генератора MFG-8215A:

- Диапазон частот 0,3 Гц — 3 МГц.
- Два прибора в одном корпусе: функциональный генератор и генератор импульсов.
- Сигналы: синусоидальный, пилообразный, треугольный и прямоугольный.
- Режим качания частоты от внешнего источника напряжения от 1:1 до 100:1.
- Малая неравномерность АЧХ: менее 0,3 дБ в диапазоне частот 0,3 Гц — 300 кГц и менее 0,5 дБ в диапазоне частот 300 кГц — 3 МГц.
- Регулировка симметрии для пилообразных и импульсных сигналов, инверсия сигналов.
- Генерация сигналов с уровнями микросхем ТТЛ и КМОП.
- Регулируемое смещение по постоянному напряжению.
- Плавный и двухступенчатый (2×20 дБ) аттенюаторы.

Генератор MFG-8216A совмещает в одном корпусе уже три прибора: функциональный генератор, генератор импульсов и цифровой частотомер. Внешний вид прибора показан на рис. 3.38.

Цифровой частотомер этого прибора имеет следующие характеристики:

- 6 разрядов с максимальной частотой до 100 МГц для внутренних и внешних сигналов.
- Стабильность опорного кварцевого генератора частотомера: 0,002% (23° С ± 5° С) после 30 минут прогрева.
- Погрешность измерения частоты: не выше 0,002% ± 1 ед. младшего разряда.

- Частотная модуляция: глубина $0 \pm 5\%$, частота: внутренняя 400 Гц, внешняя 0–20 кГц.

3.4.8. Функциональные генераторы фирмы EZ Digital

Японская фирма EZ Digital известна разработкой и производством цифровых измерительных приборов вполне умеренной стоимости. Выпускает она и ряд моделей функциональных генераторов.

На рис. 3.40 показан внешний вид функционального генератора FG-7002C. Это самый простой из генераторов данного класса фирмы EZ Digital. Помимо функционального генератора с функциями свип-генератора прибор имеет встроенный цифровой частотомер. На приборы дается гарантия в 2 года.



Рис. 3.40. Внешний вид функционального генератора FG-7002C

Основные параметры функционального генератора FG-7002C следующие:

- Диапазон частот 0,02 Гц — 2 МГц.
- 4 в 1: свип-генератор, функциональный генератор, генератор импульсов и частотомер.
- Синусоидальный, пилообразный, треугольный и импульсный сигналы на выходе.
- Встроенный частотомер до 50 МГц для внутренних и внешних сигналов.
- Режим качания частоты с внутренним и внешним управлением от 1:1 до 100:1.
- Низкие искажения для синусоидальных сигналов: менее 1% в диапазоне 0,2–100 кГц.
- Регулировка симметрии для пилообразных и импульсных сигналов.
- Сигналы с уровнями ТТЛ и КМОП.

- Регулируемое смещение по постоянному напряжению.
- Плавный и ступенчатый (-20 дБ) аттенюаторы.

Функциональный генератор FG-7005C имеет расширенный диапазон частот сверху — до 5 МГц. Внешний вид этого генератора аналогичен показанному на рис. 3.40. Основные технические характеристики (кроме верхнего значения частоты) аналогичны приведенным для генератора FG-7005C.

Функциональный генератор FG-8002 — самый простой и дешевый из серии таких приборов фирмы EZ Digital. Он имеет упрощенный корпус (рис. 3.41) и в нем нет встроенного цифрового частотомера.



Рис. 3.41. Внешний вид функционального генератора FG-7002C

Основные характеристики генератора FG-7002C:

- Диапазон частот 0,02 Гц — 2 МГц.
- Синусоидальный, пилообразный, треугольный, прямоугольный и импульсный сигналы на выходе.
- Режим качания частоты с внутренним и внешним управлением от 1:1 до 100:1.
- Низкие искажения для синусоидальных сигналов: менее 1% в диапазоне 10 Гц — 100 кГц.
- Регулировка симметрии для пилообразных и импульсных сигналов.
- Сигналы с уровнями ТТЛ.
- Регулируемое смещение по постоянному напряжению.
- Плавный и ступенчатый (-20 дБ) аттенюаторы.

Наиболее продвинутым (и дорогим) является функциональный генератор FG-7020 с встроенным цифровым частотомером, измеряющим частоты до 3 ГГц. Прибор имеет следующие характеристики:

- Диапазон частот 0,2 Гц — 20 МГц.
- 4 в 1: свип-генератор, функциональный генератор, генератор импульсов и частотомер.
- Синус, ассиметричный синус, "пила", треугольный и импульсный сигналы на выходе.
- Встроенный 8-разрядный частотомер для внутренних и внешних сигналов, стабильность $\pm 1 \times 10^{-6}$: — вход А: 0.1 Гц — 100 МГц — вход С: 80 МГц — 3 ГГц.
- Режим качания частоты с внутренним и внешним управлением от 1:1 до 10:1, 0,5 Гц ~ 50 Гц.
- Низкие искажения для синусоидальных сигналов: менее 1% в диапазоне 0,2 Гц — 100 кГц.
- Регулировка симметрии для синусоидальных, пилообразных и импульсных сигналов.
- Сигналы с уровнями ТТЛ.
- Регулируемое смещение по постоянному напряжению.
- Плавный и ступенчатый (-20 дБ) аттенюаторы.

3.4.9. Функциональный генератор VC2002 фирмы VICTOR

Простой функциональный генератор VC2002 с индикацией частоты цифровым частотомером выпускает фирма VICTOR. Внешний вид прибора представлен на рис. 3.42. Это самый недорогой из имеющихся на рынке функциональных генераторов. Это делает его идеальным выбором для школ и радиолюбителей. Он может использоваться в составе лабораторных работ или как самостоятельный прибор.

Основные характеристики прибора:

- Диапазон частот 0,2 Гц — 2 МГц.
- 8-разрядный цифровой дисплей (включая 3 разряда для индикации напряжения).
- Одновременная индикация частоты и напряжения сигнала.
- Синусоидальный, треугольный и прямоугольный сигналы на выходе.
- Регулировка симметрии 20-80%.
- Диапазон выходных напряжений (без аттенюатора) 0,9–10 В.
- Дополнительные ступенчатые аттенюаторы (-20 дБ и -40 дБ)
- Напряжение питания 110/220 В $\pm 10\%$.



Рис. 3.42. Внешний вид функционального генератора VC2002

3.4.10. Функциональные генераторы АКТАКОМ

Под торговой маркой АКТАКОМ фирма "Эликс" поставляет на наш рынок серию современных аналоговых функциональных генераторов АНР [126]. Ниже представлены краткие описания этих приборов. Более подробное описание можно найти на интернет-сайте этой фирмы.

АНР-1001/АНР-1002

Функциональный генератор с встроенным цифровым частотомером (диапазон частот от 5 Гц до 10 МГц). Внешний вид генератора показан на рис. 3.43. Сигналы: синус, треугольник, меандр, ТТЛ, с качающейся частотой; генерируемые частоты 0,01 Гц...10 МГц; амплитуда выходного сигнала 0...10 В; скорость качания 0,2...100 Гц; глубина качания 1×1...1×1000; дополнительные функции: встроенный частотомер 5 Гц...50 МГц, аттенюатор, качание по линейному и логарифмическому закону, возможность "качания внешним источником"; 220 В; габариты 261×71×211; масса 1,8 кг. Более простой (и дешевый) вариант АНР-1002 имеет аналогичные параметры, но не имеет встроенного цифрового частотомера.



Рис. 3.43. Внешний вид функционального генератора АКТАКОМ АНР-1001

АНР-1003

Функциональный генератор с встроенным цифровым частотомером (диапазон частот от 5 Гц до 50 МГц). Сигналы: синус, треугольник, меандр, ТТЛ, качание частоты; генерируемые частоты 0,01 Гц... 15 МГц (7 диапазонов); амплитуда выходного сигнала 250 мВ... 10 В; скорость качания 0,2... 100 Гц; частотная и фазовая модуляция; дополнительные функции: аттенуатор, возможность "качания внешним источником"; 220 В; габариты 261×71×211; масса 3 кг.

АНР-1012

Функциональный генератор с развитыми функциями генератора качающейся частоты. Сигналы: синус, треугольник, прямоугольник, асимметричная синусоида, ТТЛ, качание частоты; генерируемые частоты 0,2 Гц... 20 МГц (8 поддиапазонов); амплитуда выходного сигнала 500 мВ... 10 В (для нагр. 50 Ом), 500 мВ... 20 В (без нагрузки); частота качания 0,2... 50 Гц; дополнительные функции: аттенуатор, возможность "качания внешним источником", встроенный частотомер 0,1 Гц... 3 ГГц; 220 В; габариты 240×280×90 мм; масса 3 кг.

3.4.П. Заключительные замечания по аналоговым функциональным генераторам

Как видно из представленного выше материала, функциональные генераторы аналогового типа продолжают успешно совершенствоваться, хотя темпы этого трудно назвать большими. Максимальные частоты генерации у недорогих современных генераторов выросли всего в несколько раз, достигнув вместо 1 МГц значений 2–3 МГц и реже 5 МГц. Однако прогресс в элементной базе привел к значительному сокращению размеров этих приборов и уменьшению их массы до 1,5–2 кг. В несколько раз уменьшилась и потребляемая генераторами от сети переменного тока мощность.

Явно не оправдались надежды на повышение верхних генерируемых частот до примерно 100 МГц. На самом деле максимальные частоты серийных генераторов редко достигают 15–20 МГц. И дело здесь оказалось вовсе не в ограничении схемотехники и элементной базы, а в неудовлетворительной стабильности частоты, которая генерируется автоколебательными релаксационными устройствами, составляющими основу функциональных генераторов аналогового типа. Если нестабильность частоты в доли процента удовлетворительна на частотах до нескольких МГц (и то не всегда), то на частотах в десятки МГц такая нестабильность становится совершенно неудовлетворительной при отладке большинства узкополосных устройств радиодиапазона. К примеру, отладка коротковолновых профессиональных радиоприемных устройств с амплитудной модуляцией при такой нестабильности становится довольно проблематичной, так как полоса пропускания их составляет всего 5–8 кГц.

Практически не удалось заметно продвинуться и в решении другой проблемы — получении малых коэффициентов искажений и синусоидальных сигналов, получае-

мых нелинейным преобразованием треугольных сигналов. У большинства серийных функциональных генераторов аналогового типа коэффициент нелинейности имеет порядок 1% и очень редко доходит до 0,2%. Между тем, у генераторов для отладки современных высококачественных усилителей мощности низкой (например, звуковой) частоты он должен быть порядка 0,001% и даже меньше.

Сказанное не позволяет надеяться на существенное улучшение параметров аналоговых функциональных генераторов в ближайшие годы, хотя совершенствование специализированных интегральных микросхем для их построения далеко не исчерпало свои возможности. Очевидно, что существенный прогресс в совершенствовании функциональных генераторов становится возможным при переходе на методы цифрового синтеза генерируемых сигналов. Этому посвящены следующие разделы этой главы.

3.5. Функциональные генераторы с цифровым синтезом выходных сигналов

3.5.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов

Все возрастающие требования к сигналам генераторов (прежде всего, в части стабильности частоты и амплитуды и верности формы) привели разработчиков этих приборов к необходимости перехода на цифровые методы синтеза сигналов и цифровую элементную базу [112-118]. Благодаря ее применению в таких массовых изделиях, как персональные компьютеры и мобильная телефония, цифровые интегральные схемы получили бурное развитие. Это привело к повышению их функциональности и снижению стоимости.

Можно отметить три основных подхода в построении функциональных генераторов на основе цифровой схемотехники:

1. Применение *синтезаторов частоты*, резко повышающее ее стабильность и облегчающее точную установку частоты.
2. Применение *прямого цифрового синтеза формы* ограниченного числа видов сигналов (см. функциональные схемы генераторов на рис. 1.27 и 1.28).
3. Применение цифрового синтеза с возможностью задания *произвольной формы сигналов* с помощью как самого генератора, так и персонального компьютера.

Генераторы типа 1 наиболее дешевые, и их стоимость приближается к стоимости аналоговых функциональных генераторов. Цифровой синтез у них затрагивает только частоту сигнала. Применение цифрового синтеза частоты позволяет резко повысить стабильность частоты генератора и задавать ее в цифровой форме обычно с помощью кнопок ввода чисел.

Формирование синусоидального сигнала осуществляется либо с помощью *LC*-генераторов с системой фазовой автоподстройки частоты, либо нелинейным ограничением треугольного сигнала. У многих таких генераторов не предусмотрено формирование треугольного сигнала, а прямоугольные импульсы получают с помощью регенеративного порогового устройства или триггера со счетным запуском. В последнем случае частота меандра вдвое ниже частоты синусоидального сигнала.

Сказанное означает, что у генераторов типа 1 принцип формирования основных сигналов остается аналоговым и сигналы не имеют ступенек и шума квантования, которые присущи сигналам, полученным путем цифрового синтеза. Это важное обстоятельство означает, что данный класс генераторов всегда будет иметь право на жизнь.

Генераторы типа 2 полноценно реализуют прямой цифровой синтез формы сигналов. Качество их сигналов зависит, прежде всего, от разрядности квантования и частоты выборок сигналов из памяти форм. Не представляет особого труда разместить в памяти любое количество форм сигналов, разумеется, разумное, поскольку объем памяти растет с добавлением каждого нового шаблона формы нового сигнала. Многие фирмы выпускают генераторы этого типа по довольно умеренным (но не малым) ценам с числом форм от нескольких форм до нескольких их десятков.

Наконец, генераторы типа 3 наиболее полно реализуют возможности прямого цифрового синтеза, распространяя их на возможность синтеза сигналов произвольной формы. Это требует дополнительных затрат на построение генераторов: нужна память с электрической перезаписью данных, нужны средства отображения форм сигналов и их редактирования и т. д. Это, естественно, повышает стоимость генераторов произвольных функций и произвольных сигналов. В тоже время у таких генераторов нет особого смысла вводить большую библиотеку форм сигналов — их число ограничивают 10–15 формами, поскольку отсутствующую форму пользователь может легко создать самостоятельно и сохранить ее для последующего использования.

Лидирует в разработке генераторов с прямым цифровым синтезом формы корпорация Tektronix. Ее генераторы произвольных функций (AFG) и произвольных форм (AWG) имеют самые высокие частоты дискретизации и обеспечивают генерацию сигналов любой формы с заданным числом отсчетов в очень широком диапазоне частот — от 0,001 Гц до единиц ГГц. Эти генераторы мы рассмотрим отдельно в следующей главе, а ниже рассмотрим генераторы указанных выше типов других фирм.

3.5.2. Генератор сигналов VC2003 фирмы VICTOR

Генератор сигналов VC2003 фирмы VICTOR — один из самых простых и дешевых генераторов типа 1, использующих формирование сигнала методом *прямого цифрового синтеза (DDS)*. Внешний вид генератора показан на рис. 3.44.

Основные характеристики генератора VC2003:

- Разрешение по вертикали 10 бит.
- Диапазон частот: от 1 Гц до 3 МГц.

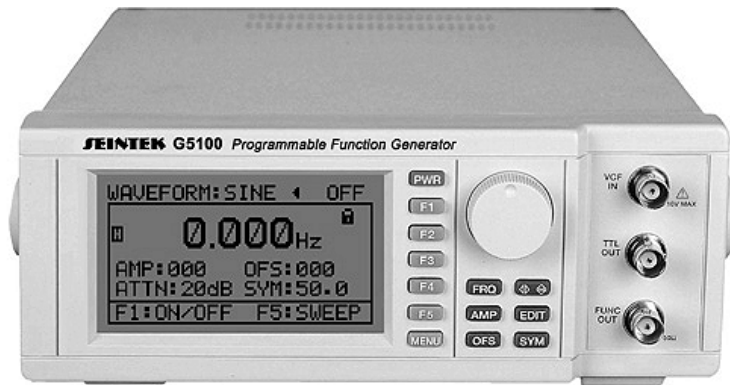


Рис. 3.45. Внешний вид программируемого функционального генератора G5100

- Синус, пила, треугольный, импульсный сигналы и сигналы TTL-уровней на выходе.
- Режим качания частоты с внутренним и внешним управлением от 1:1 до 10:1, период: от 0,05 до 9,95 с.
- Нелинейные искажения для синусоидальных сигналов: менее 1% в диапазоне 10 Гц до 100 кГц.
- Нелинейные искажения для треугольных сигналов: менее 1% в диапазоне 1 Гц до 100 кГц.
- Регулировка симметрии для пилообразных и импульсных сигналов (20–80%).
- Дисплей: матричный ЖК-дисплей с разрешением 128×64, разрядность индикации 4 разряда.
- Регулируемое смещение по постоянному напряжению.
- Плавный и ступенчатый (-20 дБ) аттенюаторы.
- Дистанционное управление с персонального компьютера через интерфейс RS232C.
- Запоминание до 8 режимов работы.
- Интерфейсы: RS232C и GP-IB (опция).

Прибор предельно прост в управлении и имеет простую конструкцию. Это один из наиболее дешевых функциональных генераторов из имеющихся на нашем рынке.

3.5.4. Функциональный свип-генератор B821 фирмы Protek

Новый функциональный свип-генератор B821 фирмы Protek рекламируется как генератор качающейся частоты, функциональный генератор и широкодиапазонный цифровой частотомер. Внешний вид прибора представлен на рис. 3.46.

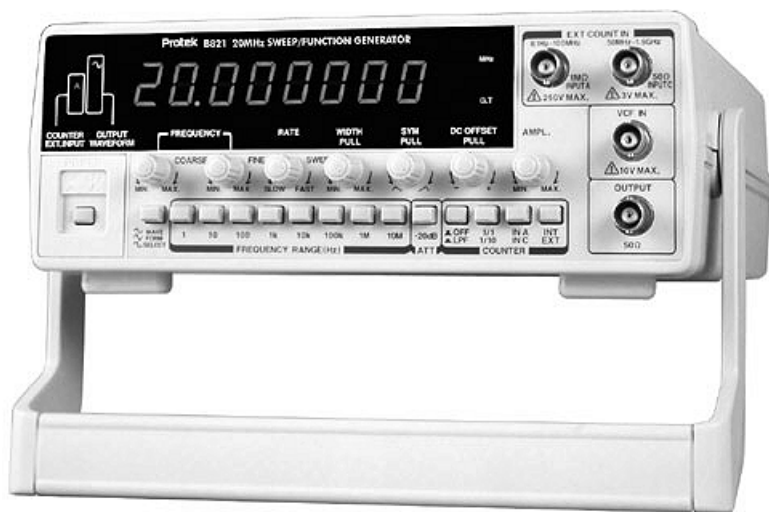


Рис. 3.46. Внешний вид функционального свип-генератора Protek B821

Основные параметры и характеристики генератора:

- Формы сигнала: синус, меандр, треугольная и прямоугольная ТТЛ с возможностью изменения симметрии.
- Частота (для синусоидального сигнала): от 0,2 Гц до 20 МГц.
- Встроенный частотомер: 8 разрядов, частота до 3 ГГц.
- Качание частоты от встроенного и внешнего источников.
- Атенюатор на выходе с ослаблением 20 дБ.

3.5.5. Функциональные генераторы АКТАКОМ серии АНР

АКТАКОМ и фирма "Эликс" [126] поставляют на российский рынок несколько моделей зарубежных функциональных генераторов с прямым цифровым синтезом формы сигналов. В основном, это приборы типа 2 с большим набором заранее встроенных форм сигнала. По техническим характеристикам и даже внешнему виду они похожи на уже рассмотренные генераторы такого типа. Поэтому приведем лишь их краткие технические характеристики. Приборы выполнены на унифицированной элементной базе, разработанной для такого рода приборов (разумеется, зарубежной).

АНР-1004

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...3 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п ... 10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10$ МГц), 1 мВп-п... 10 Вп-п (50 Ом, 10 МГц $\ll f < 10$ МГц), 2 мВп-п... 20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10$ МГц),

200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, 10 МГц $f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

АНР-1006

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...6 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, 10 МГц <math>f < 10 \text{ МГц}</math>), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, 10 МГц $f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

АНР-1010

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...10 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, 10 МГц <math>f < 10 \text{ МГц}</math>), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, 10 МГц $f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

АНР-2008

27 видов форм выходного сигнала; частотный диапазон 1 мкГц...80 МГц, выходной уровень 100 мкВ...10 Вп-п (в зависимости от частоты) на нагрузке 50 Ом, частотомер 0,001 Гц...100 МГц, память формы сигнала 4096 точек, сохранение и вызов 10 настроек, RS-232, габариты 255×370×100 мм, масса 2,7 кг.

АНР-1030

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...30 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, 10 МГц <math>f < 10 \text{ МГц}</math>), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, 10 МГц $f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

АНР-1040

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...40 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, 10 МГц <math>f < 10 \text{ МГц}</math>), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, 10 МГц $f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

АНР-1050

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, пилообразный, лестничный и др.; всего более 30 видов форм; частота выходного сигнала 0,01 Гц...50 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 10 \text{ МГц}$),

1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $10 \text{ МГц} < f < 10 \text{ МГц}$), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 10 \text{ МГц}$), 200 мкВп-п...6 Вп-п (1 МОм, $10 \text{ МГц} < f \leq 30 \text{ МГц}$); интерфейс GPIB; габаритные размеры 240×90×293 мм; масса 2,5 кг.

3.6. Виртуальные функциональные генераторы

3.6.1. Назначение и особенности виртуальных функциональных генераторов

Функциональные генераторы, выполненные в виде специализированных и полностью законченных приборов, выпускаются как довольно дорогие приборы. Чем шире диапазон частот и амплитуд таких генераторов и чем выше стабильность их частоты, тем они дороже. Наряду с аналоговыми функциональными генераторами на основе интеграторов, выпускаются обычно намного более дорогие цифровые функциональные генераторы, синтезирующие сигналы цифровыми методами [96-99, 110].

Одним из направлений развития функциональных генераторов (как правило, цифровых) являются *виртуальные функциональные генераторы*, выполненные в виде приставок или плат расширения к персональным компьютерам. Виртуальность приборов проявляется в том, что их органы управления физически отсутствуют и пользователь пользуется виртуальной передней панелью, которая создается на экране дисплея компьютера. На физической передней панели генератора-приставки к ПК имеются только сигнальные разъемы, да иногда и выключатель питания. Все управление генератором осуществляется от компьютера.

Следует отметить, что виртуальные функциональные генераторы обычно имеют возможность создания произвольных сигналов. Однако задание произвольной формы сигналов средствами самого генератора отсутствуют, это возможно только программным путем. Поэтому эти приборы рассматриваются в данной главе, а не в следующей, где описаны основные модели генераторов произвольных функций и сигналов.

3.6.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman

Одними из первых на наш рынок поступили виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman Instruments PCG10 [96-99], которые, как и виртуальные осциллографы этой фирмы PCS500 и PCS100, можно приобрести в наших магазинах. Выпускается и набор для их сборки K8016.

Приставка — виртуальный цифровой функциональный генератор — поставляется в двух вариантах: конструктора (K8016) и готового изделия (PCG10) (рис. 3.47). Уникальная особенность генератора — его совместимость с PC-осциллографами Velleman PCS64i и PCS500 для создания измерительного комплекса с расширенными возможностями отображения данных на дисплее.



Рис. 3.47. Приставка — функциональный генератор PCG10 (вид спереди)

Малая (0,01 Гц) нижняя частота генератора позволяет успешно использовать его в практике сверхнизкочастотных измерений. Кроме того, эта дешевая приставка является полноценным цифровым синтезатором сигналов, причем не только стандартных (синус, треугольные и прямоугольные импульсы), но и произвольной формы! Форма создаваемых приставкой сигналов задается программным путем. Приставка — функциональный генератор имеет следующие особенности построения:

- Кварцевая стабилизация частоты.
- Оптическая изоляция от ПК.
- Основные формы сигналов: синусоидальная, прямоугольная (меандр) и треугольная симметричная.
- Дополнительный выход для синхронизации сигнала TTL-уровня.
- Библиотека файлов форм дополнительных сигналов.
- Возможность создания индивидуальных форм сигналов.

Основные параметры генератора следующие:

- Диапазон частот: 0,01 Гц — 1 МГц.
- Источник питания: адаптер 12 В/800 мА (PS1208).
- Разрешение по частоте: 0,01%.
- Вертикальное разрешение: 8 бит (0,4 % от полной шкалы).
- Диапазон амплитуды: 100 мВ 10 В при нагрузке 600 Ом.
- Отклонение от нуля: от 5 до +5В max (0,4% от полной шкалы).
- Максимальная частота дискретизации: 32 МГц.
- Коэффициент гармоник синусоиды: менее 0,08%.
- Выходной импеданс: 50 Ом.
- Размеры: 235×165×47 мм.

Внешний вид приставки сзади показан на рис. 3.48. Особенностью приставки является возможность ее работы совместно с виртуальными осциллографами фирмы Velleman. Для этого приставка оснащена двумя разъемами принтерного порта LPT: одним она подключается к порту компьютера, а другим к приставке виртуального осциллографа. В результате создается комплекс для проведения самых различных измерений и исследований с возможностью обработки результатов на ПК. Кроме того, сзади приставки имеется разъем для подключения внешнего адаптера питания от сети переменного тока с выходным напряжением постоянного тока 9 В.



Рис. 3.48. Приставка — функциональный генератор PCG10 (вид сзади)

На рис. 3.49 показан вид печатной платы приставки K8016, поставляемой в виде конструктора для самостоятельной сборки. Видно также расположение печатной платы приставки в корпусе.

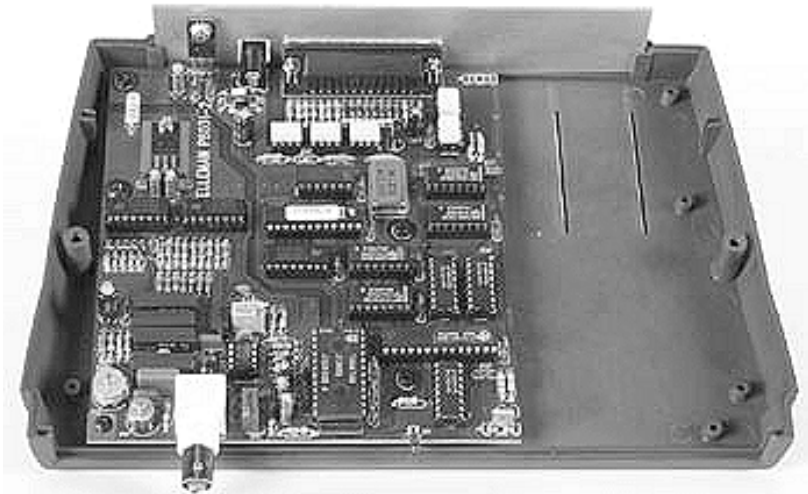


Рис. 3.49. Плата приставки — функционального генератора K8016 в корпусе

3.6.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman

Функциональный генератор включается с помощью программы PC-Lab 2000, окно которой показано на рис. 3.50. В разделе Function Generator необходимо установить темный кружок у выбранного типа генератора.



Рис. 3.50. Окно программы PC-Lab 2000

Для запуска генератора достаточно активизировать мышью кнопку Function Generator. При этом появится окно управления генератором, показанное на рис. 3.51 справа. В нем есть окошко для наблюдения осциллограммы генерируемого сигнала, а также кнопки (снизу) установки частоты и формы импульсов, а также органы плавной регулировки частоты, амплитуды и смещения импульсов.

Программное обеспечение прибора позволяет устанавливать форму импульсов загрузкой соответствующего библиотечного файла. Для этого необходимо активизировать кнопку MORE FUNC. Появится еще одно окно генератора (оно также видно на рис. 3.51). В нем помимо кнопок еще ряда форм генерируемых сигналов имеется кнопка Library Waveforms (Библиотека форм сигналов), которая открывает стандартное Windows-окно загрузки библиотечных файлов. Среди них достаточно выбрать подходящий, и форма импульсов будет изменена.

Есть также возможность задать импульсы самим пользователем. Для этого достаточно исполнить команду Wave Editor в позиции Tools меню окна функционального генератора. Откроется окно редактора формы импульсов, показанное на рис. 3.52.

В этом окне можно задать до 32-Кбайтовую последовательность, определяющую форму генерируемого импульса. Каждый байт задает значение от 0 до 255, причем значение 128 соответствует центральной позиции экрана формы импульсов. Повторяющиеся значения байтов можно указывать в скобках, например, 150(5) означает, что значение 150 повторяется пять раз подряд. На экране форм строится график двух периодов импульсов.

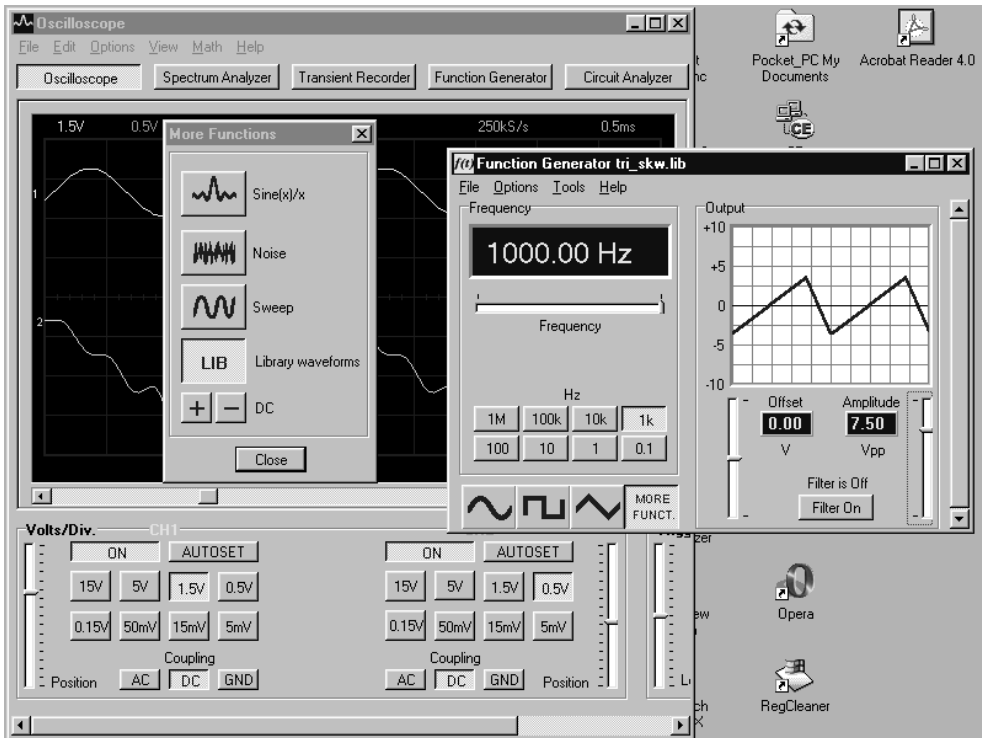


Рис. 3.51. Работа с генератором PCG10 с помощью программы PC-Lab 2000

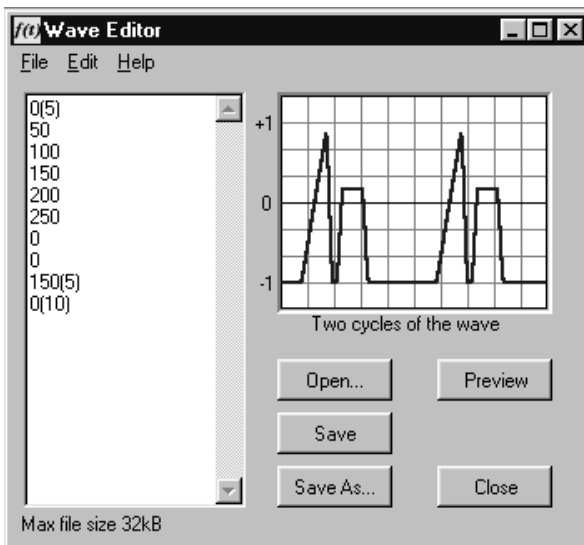


Рис. 3.52. Окно редактора формы импульсов

Благодаря возможности работы совместно с персональным компьютером и виртуальными осциллографами функциональный генератор PCG10 может использоваться для создания достаточно дешевой и простой компьютеризированной лаборатории.

3.6.4. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000

Как уже отмечалось ранее, фирма Velleman Instruments выпускает виртуальные осциллографы PCS500, PCS100 и K8031 и виртуальные функциональные генераторы PCG10 и K8016. Эти приборы выполнены в одинаковых по конструкции корпусах и, вместе с прилагаемым программным обеспечением на CD-ROM, могут использоваться для создания компьютеризированной лаборатории на базе обычного настольного или мобильного компьютера. Вместе с обычным персональным компьютером образуют миниатюрную *виртуальную многофункциональную лабораторию PC-Lab 2000*, позволяющую исследовать и отлаживать различные электронные схемы, устройства и системы. На рис. 3.53 представлена такая действующая лаборатория на основе мобильного компьютера — ноутбука Satellite 1800-314 корпорации Toshiba [125].



Рис. 3.53. Внешний вид компьютерной измерительной системы на базе виртуальных приборов и мобильного компьютера — ноутбука Satellite 1800-314 корпорации Toshiba

Компьютер (настольный или мобильный — ноутбук), используемый совместно с описанными приборами, должен работать с операционной системой Windows 95, 98, 2000/NT/XP, иметь SVGA-видеокарту (с разрешением 800×600) и арифметический со-

процессор для спектроанализатора. Подключение устройств осуществляется через принтерный порт LPT1, LPT2 или LPT3. Сборка лаборатории и подключение ее к компьютеру занимает от силы пару минут. Она сводится к подключению кабелей к разъемам, расположенным сзади корпусов осциллографической приставки и приставки-генератора. Сигнальные коаксиальные кабели подключаются со стороны передних панелей к коаксиальным разъемам — они видны на рис. 3.53. Следует отметить, что приставки имеют оптическую изоляцию от цепей компьютера, что надежно защищает последний (но не сами приставки) от повреждений.

Необходимо также установить программное обеспечение — программу PC-LAB 2000 с прилагаемого CD-ROM (он виден на рис. 3.53). Установка этой программы ничем не отличается от установки любого Windows-приложения. Однако необходимо учитывать, что для ПК с операционной системой Windows NT или Windows 2000 нужно дополнительно установить драйвер локального Администратора, который также имеется на CD-ROM (возможна его установка после установки самой программы).

После установки программы PC-LAB 2000 создается папка с ее ярлыком и рядом вспомогательных файлов ее справки, содержащей описание программы и работы с основными компонентами лаборатории с ней в целом. К сожалению, русскоязычной справки нет. Хотя, следует сказать, что работа с лабораторией достаточно опытного пользователя (специалиста или радиолюбителя) вполне ясна и понятна.

Интересно отметить, что программу PC-LAB 2000 можно бесплатно скачать с интернет-сайтов корпорации Velleman Instruments и нашей сети магазинов электронных компонентов Chip-Dip. Это позволяет познакомиться с возможностями лаборатории с помощью демонстрационного режима demo. Его можно задать в окне начального запуска программы, показанном на рис. 3.49. Это окно позволяет также выбрать тип осциллографа, тип генератора и адрес принтерного порта LPT, через который компоненты лаборатории подключаются к ПК. Подробно работа с программой описана в [96-99].

3.6.5. Функциональные генераторы АКТАКОМ АНР-3121/3122

АКТАКОМ производит виртуальные функциональные генераторы АНР-3121/3122 (рис. 3.54), предназначенные для генерации сигналов стандартной формы (синусоида, меандр, треугольный сигнал и др.) и произвольных с заданием и программированием их параметров с помощью персонального компьютера.

Приставка имеет следующие возможности:

- Генерация сигналов разной формы, программируемых с помощью ПК.
- Встроенный редактор сигналов произвольной формы.
- Встроенный калькулятор формул.
- Режим "Лазерное шоу" для генерации произвольных фигур Лиссажу.
- Внутренний и внешний запуск.



Рис. 3.54. Приставка — функциональный генератор АНР-3121/3122

- Управление синхронизацией, частотой и фазовым сдвигом.
- Запись в файлы и чтение из них данных и форм сигналов.
- Подключение ПК через последовательный порт RS-232 и параллельный порт.
- Программное обеспечение под операционные системы Windows 98/ME/NT 4/2000/XP (на прилагаемом компакт-диске).

Генератор имеет приведенные ниже характеристики:

- Генерация стандартных сигналов (синусоида, меандр, треугольные импульсы, пилообразные импульсы и "вспышка") в одном канале.
- Диапазон частот от 0,02 Гц до 10 МГц.
- Максимальный размах напряжения $\pm 2,5$ В (АНР-3121) и ± 10 В (АНР-3122).
- Сопротивление нагрузки от 50 Ом и выше.
- Фильтр низких частот с граничной частотой 15 МГц.
- Максимальная частота формирования выходного сигнала 80 МГц.
- Длина памяти 128 кбайт на канал.

3.6.6. Комбинированный прибор АКТАКОМ АСК-4106

Комбинированный прибор АКТАКОМ АСК-4106 (рис. 3.55) сочетает возможности двухканального запоминающего цифрового осциллографа и генератора сигналов произвольной формы двухканального цифрового [110]. Прибор работает совместно с

компьютером по интерфейсам USB 1.1 или LPT в режиме EPP. По существу прибор является вполне законченной виртуальной лабораторией с довольно высокими техническими характеристиками и обширными функциональными возможностями.

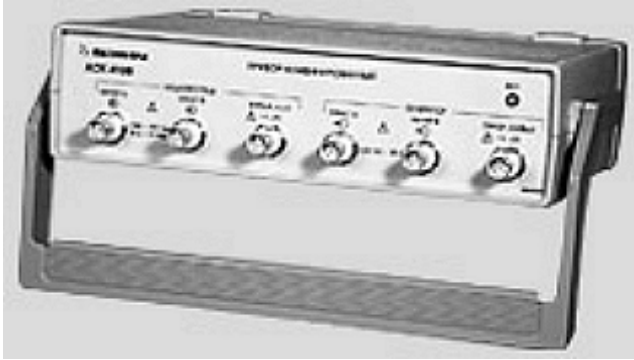


Рис. 3.55. Внешний вид приставки — комбинированного прибора АСК-4106

Прибор состоит из двух функциональных модулей: модуля двухканального цифрового запоминающего осциллографа и модуля генератора сигналов произвольной формы.

Модуль двухканального цифрового запоминающего осциллографа предназначен для изучения сигналов от внешних устройств, их отображения на мониторе компьютера, измерения параметров сигналов и математической обработки с помощью программного обеспечения. Модуль генератора предназначен для выдачи сигналов произвольной формы, включая стандартные, а также задаваемые пользователем с помощью математических выражений или графически. Модули могут работать как независимо друг от друга, так и совместно под управлением соответствующего программного обеспечения.

Прибор применяется для наладки, ремонта, лабораторных исследований и испытаний приборов и систем, используемых в радиоэлектронике, связи, автоматике, вычислительной и измерительной технике, приборостроении. Рассмотрим технические характеристики прибора.

Технические характеристики осциллографического модуля:

- Количество каналов с независимым АЦП: 2 (все каналы идентичны).
- Максимальная эквивалентная частота выборок в стробоскопическом режиме 10 ГГц.
- Максимальная частота дискретизации 100 МГц.
- Максимальное число выборок на канал — 131072.
- Число разрядов АЦП — 8.
- Режимы каналов: А, В, А и В.
- Выбор режима работы осциллографа: одно-, двухканальный.
- Число отображаемых точек на экране 100...131072.
- Курсорные измерения: по уровню и длительности сигналов.

- Тип интерфейса ПЭВМ: LPT, USB 1.1.
- Тип входных разъемов: BNC (CP-50).
- Ширина линии графика: 1 пиксел.
- Диапазон частот входных сигналов по уровню -3 дБ на пределах 20 мВ/дел ... 1 В/дел не менее 100 МГц и на пределах 2 В/дел ... 10 В/дел не менее 70 МГц.
- Входной импеданс: 1 МОм $\pm 5\%$, 20 пФ ± 5 пФ; 50 Ом $\pm 2\%$.
- Входное сопротивление: 1 МОм и 50 Ом.
- Пределы допускаемой основной относительной погрешности коэффициентов отклонения $\pm 2,5\%$.
- Дополнительные значения коэффициента отклонения: 2 мВ/дел., 5 мВ/дел., 10 мВ/дел.
- Разрешение: 8 бит (256 точек на шкалу).
- Коэффициент развязки между каналами: не менее -40 дБ во всем частотном диапазоне.

В стробоскопическом режиме при коэффициентах развертки менее 1 мкс/дел возможна нестабильность амплитуды отображаемого сигнала до $\pm 2\%$, а также искажение формы сигнала или его отсутствие на краях собираемого буфера данных в пределах 10 нс. Максимальное входное напряжение не более двукратного превышения полной шкалы для каждого предела, но не более 100 В пикового значения при сопротивлении входа 1 МОм и не более 5 В пикового значения при сопротивлении входа 50 Ом.

Параметры синхронизации:

- Источник синхронизации: каналы А, В, внешний вход.
- Выбор фронта синхронизирующего сигнала: передний или задний фронт.
- Максимальная частота: не меньше верхней границы полосы пропускания.
- Внутренняя синхронизация: минимальный размах синусоидального сигнала не более 1 клетки масштабной сетки в диапазоне частот до 40 МГц.
- Параметры сигнала для запуска внешних устройств (разъем "СИНХРОНИЗАЦИЯ ВХОД/ВЫХОД"): перепад от 0 до 3 В в момент запуска синхронизации. В конце регистрации перепад от 3 до 0 В на нагрузке не менее 1 кОм.
- Внешняя синхронизация: минимальный период повторения синхронизирующего импульса 20 нс, минимальная длительность синхронизирующего импульса 10 нс, TTL-уровень напряжения.
- Предельные значения напряжения на входе синхронизации: от -1 до +6 В.
- Импеданс входа синхронизации: не менее 50 кОм, 20 пФ.

Параметры развертки:

- Диапазон значений коэффициента развертки (при установке 1 000 выборок на экран): 10 нс/дел ... 0,1 с/дел.

- Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности коэффициентов развёртки: $\pm(0,001 \cdot T + 10^{-9} \text{ с})$, где T — длительность развёртки, $T = \text{Кразв} \cdot 10 \text{ дел.}$, Кразв — коэффициент развёртки.
- Дополнительные значения коэффициента развёртки в режиме самописца: от 1 мс/дел до 100 ч/дел.
- Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры в пределах рабочей области температур: не более предела основной погрешности на каждые 10° С изменения температуры.

Параметры калибратора:

- Выходной сигнал: прямоугольный, со скважностью 2.
- Частота выходного сигнала: 1 кГц.
- Выходное напряжение: 3 В от пика до пика.
- Выходное сопротивление: $(150 \pm 50) \text{ Ом}$.
- Выходной разъем: BNC, совмещен с входом внешней синхронизации.

Параметры функционального генератора:

- Количество выходных каналов: 2.
- Диапазон частот выходного сигнала: от 0,1 Гц до 10 МГц.
- Частота сигнала, воспроизводимая генератором, определяется его тактовой частотой и длиной сигнала по формуле: $f = fT/N$, где: f — частота сигнала; fT — тактовая частота генератора, может быть установлена в одно из 16 значений: максимальное — 80 МГц, каждое последующее — в 2 раза меньше — 40, 20, 10 МГц и т. д. до 2,441 кГц; N — длина сигнала: любое четное целое число выборок в диапазоне от 8 до 131000.
- Основная относительная погрешность воспроизведения частоты: не превышает $\pm 0,05\%$.
- Дополнительная погрешность воспроизведения частоты, вызванная изменением температуры в пределах рабочей области температур, не превышает $0,05\%$ на каждые 10° С изменения температуры.
- Максимальный размах выходного напряжения: на нагрузке 1 МОм $\pm 2,5 \text{ В}$, на нагрузке 50 Ом $\pm 1,25 \text{ В}$.
- Шаг дискретной установки выходного напряжения: на нагрузке 1 МОм не более 1,5 мВ, на нагрузке 50 Ом не более 1,0 мВ.
- Неравномерность уровня выходного синусоидального напряжения в диапазоне частот относительно уровня на частоте 1 кГц: не превышает $\pm 1 \text{ дБ}$.
- Длительность фронта и среза (каждого в отдельности) прямоугольного сигнала не превышает 20 нс.

Режимы синхронизации:

- Выбор режимов синхронизации: перезапуск, однократный (ручной) или непрерывный источник внешний или внутренний.
- Полярность: по восходящему или по спадающему фронту.
- Входной сигнал внешней синхронизации: прямоугольный импульс с ТТЛ-уровнями, длительностью фронта не менее 10 нс.
- Выходной сигнал синхронизации — прямоугольный импульс, ТТЛ-уровень на нагрузке 1 КОм, длительность импульса в нс $2/fT$, где fT выражена в МГц, длительность фронта не более 20 нс.
- Выбор формы для обоих каналов: независимый.
- Максимальное число точек на канал: 131 000.
- Частота среза отключаемого фильтра нижних частот: 15 МГц $\pm 20\%$.
- Максимальная тактовая частота: 80 МГц.

Прочие характеристики:

- Интерфейс связи с ПК: USB 1.1 или LPT в режиме EPP.
- Питание: 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц.
- Потребляемая мощность: не более 20 Вт.
- Время непрерывной работы: не менее 8 ч.
- Время установления рабочего режима: не более 15 мин.
- Срок службы прибора: не менее 6 лет.
- Рабочие условия эксплуатации: температура $+5\dots+40^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха не более 80% при 25°C , атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст.
- Условия хранения: температура $-30\dots+50^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха 30...80%.
- Габаритные размеры (ширина \times высота \times глубина) 260 \times 70 \times 210 мм.
- Масса: не более 2,0 кг.

Возможности USB-лаборатории АКТАКОМ достаточно обширны и описаны в [110].

Генераторы сигналов произвольной формы

Генераторы сигналов произвольной формы — новое направление развития техники генерации сигналов, основанное на прямом цифровом синтезе различных, в принципе произвольных, форм сигналов. Описаны серийные генераторы сигналов произвольной формы, их параметры и характеристики. Значительное внимание уделено их связи с компьютерами и программному обеспечению, обеспечивающему такую связь.

4.1. Генераторы сигналов произвольной формы зарубежных фирм

4.1.1. Назначение и особенности генераторов сигналов произвольной формы

Прямой цифровой синтез сигналов произвольной формы открыл возможности построения нового поколения цифровых генераторов сигналов — как множества стандартных форм, так и произвольных [112-118]. Однако, как отмечалось в главе 1, введение синтеза произвольных сигналов неизбежно усложняет такие генераторы, так как требует применения перепрограммируемой электрическим способом памяти, введения редактора форм сигналов и средств отображения синтезируемой формы сигнала. В связи с этим генераторы этого типа (3 по указанной в разделе 3.5.1 классификации) относятся к достаточно сложным и дорогим приборам.

Тем не менее, такие приборы в целом ряде случаев остро необходимы. По мере усложнения связной, телекоммуникационной, телевизионной и радиолокационной техники растет число форм сигналов, необходимых для ее тестирования. Уже сейчас число форм тестируемых сигналов просто не поддается воображению. Единственной гарантией получения нужной формы сигналов является переход к технике прямого цифрового синтеза произвольных сигналов.

Утверждения о генерации произвольных сигналов несут в себе некоторую долю лукавства. Дело в том, что цифровой синтез сигналов возможен с точностью во времени

до периода дискретизации сигнала и по уровню с точностью до квантования по уровню (разрядности ЦАП). В силу этого набор "произвольных" сигналов на самом деле оказывается набором просто очень большого, но все же конечного, числа форм сигналов. Однако при квантовании сигналов с разрядностью 8–14 бит и числом отсчетов сигналов в несколько тысяч количество возможных форм настолько велико, что на практике можно говорить о синтезе сигнала практически любой (в пределах описанных ограничений) формы сигналов.

Итак, применяя генераторы с прямым цифровым синтезом произвольных сигналов, пользователь — специалист должен постоянно помнить о двух важнейших параметрах таких сигналов: разрядности их квантования по уровню (иногда говорят по амплитуде, но это не совсем верно) и о длине сигнала — т. е. числе отсчетов сигнала, взятых из памяти. Оба эти параметра часто измеряются в битах, хотя нередко длина сигнала задается в обычной десятичной системе исчисления.

Но есть еще один весьма важный параметр таких генераторов — это *период выборки* или (гораздо чаще) *частота выборки*. Дело в том, что частота генерируемого сигнала равна отношению частоты выборки к их числу (т. е. длине сигнала). Уже известная нам из главы 1 теорема об отсчетах (Котельникова) говорит о том, что частота сигнала должна быть, по крайней мере, в два раза ниже частоты выборки. Однако это верно для весьма примитивного сигнала. На самом деле частота выборки должна значительно (в 5–6 раз и больше) превышать частоту сложного сигнала. Более точно говорить о том, что частота выборки, о чем и свидетельствует указанная теорема, должна быть хотя бы вдвое выше, чем максимальная гармоника спектра произвольного и повторяющегося сигнала.

Между тем получение высокой частоты выборки — сложная техническая задача. Из фирм, производителей генераторов с прямым цифровым синтезом формы сигналов, в этой области, несомненно, лидирует корпорация Tektronix. Даже у младших моделей ее генераторов этого типа AFG3*** максимальная частота выборки достигает 1 и даже 2,5 ГГц [94]. Тогда как у генераторов других фирм умеренного класса она составляет обычно 200 МГц. Еще выше частота выборки и генераторов фирмы Tektronix высшего класса — серий AWG 5000 и 7000. У генераторов серии AWG 7000 она достигает рекордных значений в 20 ГГц, что позволяет генерировать сигналы с частотами до, примерно, 5 ГГц.

При использовании генераторов произвольных функций следует учитывать, что максимальные частоты генерации указываются обычно только для синусоидального напряжения. Для встроенных в память импульсных сигналов они могут быть намного более низкими. Поэтому перед окончательным решением о приобретении того или иного генератора полезно ознакомиться с полными их техническими характеристиками.

Мы рассмотрим генераторы произвольных функций и форм сигналов, начиная с относительно простых моделей, затем наиболее полно опишем массовые генераторы Tektronix серии AFG 3000, и затем обзорно опишем уникальные и дорогие модели генераторов AWG 5000 и 7000. Это даст достаточно полное представление о данном классе генераторов.

4.1.2. Генераторы сигналов произвольной формы фирмы Protek

Одну из самых массовых и известных серий генераторов сигналов произвольной формы выпускает фирма Protek (в главе 3 были описаны ее более простые функциональные генераторы). Она начинается с генератора Protek 9305.

Основные возможности и характеристики этого генератора:

- Формирование сигнала методом прямого синтеза (DDS).
- Диапазон частот основных типов сигналов от 100 мкГц до 5 МГц.
- Разрешение по вертикали 12 битов, частота дискретизации 200 МГц.
- Память формы сигнала 4 096 точек.
- Высокая точность установки коэффициента заполнения — до 1/1000.
- Режимы модуляции сигнала: АМ, ФМ, ЧМ, ИМ.
- Высокая точность и разрешающая способность установки ЧМ сигналов.
- Плавная регулировка фазы в сигналах с высокочастотным заполнением.
- Раздельная установка частот старта и остановки в режиме качания частоты.
- Произвольная установка глубины АМ (от 1 до 120%).
- 10 каналов памяти для синтезируемых сигналов.
- 27 типов стандартных выходных сигналов (плюс произвольно задаваемые сигналы).
- Встроенный частотомер с частотой измерения до 100 МГц.
- RS232C интерфейс, GPIB интерфейс (опция).

Другие генераторы сигналов произвольной формы Protek отличаются только более высокой максимальной генерируемой частотой:

- **9310** — до 10 МГц;
- **9320** — до 20 МГц;
- **9340** — до 40 МГц;
- **9380** — до 80 МГц;
- **93120** — до 120 МГц.

Фирма Protek охотно идет на сотрудничество с российскими фирмами, и ее приборы в Россию поставляются под торговыми марками АКТАКОМ и АК ИП. Их представляют фирмы "Эликс" и "Прист" соответственно.

4.1.3. Генераторы сигналов произвольной формы АКТАКОМ и АК ИП

Под торговой маркой АКТАКОМ на нашем рынке представлена серия генераторов произвольной формы АНР, подобная генераторам фирмы Protek. Рассмотрим кратко их характеристики.

АНР-4010

Форма выходного сигнала: синус, прямоугольник, импульс, треугольник, лестничный, пилообразный, произвольный, кардиограмма, $\sin(x)/x$, шум, экспонента, логарифм и пр.; частота выходного сигнала 10 мГц...10 МГц; амплитуда выходного сигнала 1 мВп-п...10 Вп-п (50 Ом, $f \leq 20$ МГц), 100 мкВп-п...3 Вп-п (50 Ом, $f > 20$ МГц), 2 мВп-п...20 Вп-п (1 МОм, $f \leq 20$ МГц), 200 мВп-п...6 Вп-п (1 МОм, $f > 20$ МГц); интерфейс RS-232 и опционально IEEE-488; габаритные размеры 240×90×300 мм; масса 3 кг.

Другие модели отличаются максимальной частотой генерации синусоидального напряжения:

- АНР-4020 20 МГц;
- АНР-4040 40 МГц;
- АНР-4060 60 МГц;
- АНР-4080 80 МГц;
- АНР-4120 120 МГц.

Под торговой маркой АК ИП на нашем рынке представлена аналогичная серия генераторов: ГСС-05, ГСС-05/1, ГСС-10, ГСС-10/1, ГСС-20, ГСС-20/1, ГСС-40, ГСС-40/1, ГСС-80, ГСС-80/1, ГСС-120, ГСС-120/1. Как нетрудно понять, цифры указывают на верхний предел частоты в мегагерцах. Генераторы с цифрой 1 под дробной чертой имеют повышенную стабильность частоты. На рис. 4.1 показан внешний вид генератора ГСС-80. Он характерен и для генераторов клона АКТАКОМ и оригинальных моделей фирмы Protek.

4.1.4. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent

Представителем функциональных генераторов высокого класса является модель 33220A, известная своими высококласными измерительными приборами фирмы Agilent Technologies. Внешний вид прибора спереди и сзади представлен на рис. 4.2. Прибор имеет диапазон частот сигналов до 20 МГц с возможностью цифровой установки частоты и ее контролем по встроенному цифровому частотомеру. Прибор вырабатывает 11 стандартных форм сигналов и сигналы произвольной формы. Имеется возможность АМ, FM, PM, FSK и PWM модуляции.

Принцип формирования сигнала — прямой цифровой синтез. Используется 14-битовое кодирование со скоростью до 50 Мвыб/с при длине сигнала в 64 К точек. Возможно линейное и логарифмическое качание частоты. Предусмотрена связь с компьютером по интерфейсам USB, GPIB и LAN.

Фирма Agilent Technologies выпускает также генератор этой серии 33280A. Он имеет диапазон частот синусоидального сигнала от 1 мГц до 80 МГц с разрешением в 1 мГц для синуса и меандра. В таблице на рис. 4.3 приведены более детальные данные о технических характеристиках генераторов произвольных функций фирмы Agilent Technologies.



Рис. 4.1. Внешний вид генератора сигналов произвольной формы ГСС-80



Рис. 4.2. Функциональный генератор 33220А фирмы Agilent Technologies

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	33220A		33280A	
		1 мГц – 20 МГц	1 мГц	1 мГц – 80 МГц	1 мГц – 80 МГц
ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Частотный диапазон	1 мГц – 20 МГц			
	Разрешение	1 мГц			
СИНУСОИДА	Погрешность установки уровня на 1 мГц	$\pm 20 \times 10^{-6}$			
	Погрешность уст-ки частоты	$\pm 2 \times 10^{-6}$			
СИНУСОИДА	Выходной уровень	10 мВ...10 В _{нагрузка} на нагрузку 50 Ом			
	Погрешность установки уровня на 1 мГц	$\pm (1\% + 1 \text{ мВ})$			
СИНУСОИДА	Неравномерность АЧХ относительно 1 кГц	0,1 дБ при частоте менее 100 кГц, 0,15 дБ для частот от 100 кГц до 5 МГц, 0,3 дБ для частот от 5 МГц до 20 МГц.	0,1 дБ при частоте менее 10 МГц, 0,2 дБ для частот от 10 МГц до 50 МГц, 0,4 дБ для частот от 50 МГц до 80 МГц.		
	Коэффициент гармоник	$\leq -70 \text{ дБн (0,04\%)} \text{ до } 20 \text{ кГц},$ $< -65 \text{ дБн до } 100 \text{ кГц},$ $< -50 \text{ дБ до } 1 \text{ МГц},$ $< -40 \text{ дБн до } 20 \text{ МГц}$	$\leq -80 \text{ дБн (0,2\%)} \text{ до } 1 \text{ МГц},$ $< -57 \text{ дБн до } 5 \text{ МГц},$ $< -37 \text{ дБ до } 80 \text{ МГц}$		
ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ	Диапазон (пис. знач. AC+DC)	$\pm 5 \text{ В на нагрузку } 50 \text{ В}$			
МЕАНДР	Погрешность установки	$\pm 2\%$		$\pm 1\%$	
	Частотный диапазон	1 мГц – 20 МГц		1 мГц – 80 МГц	
МЕАНДР	Время нарастания/спада	$< 13 \text{ нс}$		$< 8 \text{ нс}$	
	Выброс	$< 2\%$		$< 5\%$	
МЕАНДР	Перестраиваемая скважность	20% - 80% (до 10 МГц), 40% - 60% (до 20 МГц)		20% - 80% (до 25 МГц), 40% - 60% (до 50 МГц)	
	Погрешность установки скважности	$\pm 1\%$			
МЕАНДР	Джиттер	1 нс		75 пс	
	Диапазон частот	1 мГц – 200 кГц		1 мГц – 1 МГц	
ПИЛА, ТРЕУГОЛЬНИК	Нелинейность	$< 0,1\%$			
	Перестраиваемая скважность	0,0% – 100,0%			
ИМПУЛЬС	Диапазон частот	500 мГц – 5 МГц		500 мГц – 50 МГц	
	Длительность импульса	От 20 нс		От 8 нс	
ИМПУЛЬС	Перестраиваемое время нарастания	От 13 до 100 нс		5 нс – 1 мс	
	Выброс	$< 2\%$		$< 5\%$	
ИМПУЛЬС	Джиттер	300 пс		50 пс	
	Полоса частот (белый шум)	9 МГц		50 МГц	
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Диапазон частот	1 мГц – 8 МГц		1 мГц – 25 МГц	
	Длина памяти	2 – 64 тысячи точек		1 - 64 тысячи точек	
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Разрешение ЦАП	14 бит (включая знак)		12 бит (включая знак)	
	Частота дискретизации	50 МГц		200 МГц (фильтр полосы 50 МГц)	
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Память	4 ячейки			
	Встроенные сигналы	Нарастающая и спадающая экспонента, кардиосигнал, sin x/x			
АМ, ЧМ	формы несущей	Синус, меандр, пила, произвольная			
	Источник модуляции	Внешний/внутренний			
АМ, ЧМ	Модулирующее колесо (внутреннее)	Синус, меандр, пила, треугольник, шум, произвольная (частота до 20 кГц)			
	Девияция частоты	До 10 МГц (пиловая)		До 90 МГц (пиловая)	
АМ, ЧМ	Коэффициент АМ	1... 120 % (АМ); разрешение 0,1 %			
	Общие данные	Напряжение питания		220 В ($\pm 15 \%$), 50 / 60 Гц	
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Габаритные размеры	261 × 104 × 303 мм		254 × 104 × 274 мм	
	Масса	3,4 кг		4,6 кг	
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Комплект поставки	Сетевой шнур (1), руководство по эксплуатации, ПО, USB или RS-232 кабель			

Рис. 4.3. Технические характеристики генераторов 33220A и 33280A фирмы Agilent Technologies

4.1.5. Двухканальный генератор произвольных сигналов R&S AM300

Высококачественный двухканальный генератор произвольных сигналов AM 300 выпускает фирма RÖNDE&SCHWARZ, известная разработкой и выпуском обширной серии генераторов синусоидальных колебаний с цифровым синтезом и самым широким частотным диапазоном — до десятков ГГц [95]. Генератор AM300 прекрасно дополняет эту серию. Внешний вид прибора показан на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Внешний вид генератора произвольных сигналов R&S AM300

Технические характеристики генератора:

- Два канала с произвольно выбираемой частотой, амплитудой и формой сигналов.
- Режимы работы CH1, CH2 и CH1+CH2.
- Установка фазового сдвига сигналов с точностью до $0,01^\circ$.
- Подавление высших гармоник синусоидального сигнала 70 дБ на частоте 1 МГц.
- Генерация квадратурных I/Q составляющих с помощью программы R&S WinQSIM.
- Опорный высокостабильный генератор с частотой 50 МГц и долговременной нестабильностью менее 10^{-6} .
- Диапазон частот синусоидального сигнала от 10–5 до 35 МГц.
- Разрешение по частоте 10^{-5} Гц.
- Частота треугольного, прямоугольного, пилообразного и экспоненциального сигналов от 10^{-5} Гц до 500 кГц.
- Частота импульсного сигнала от 10–5 Гц до 16,667 МГц.
- Эффективная полоса шумового сигнала 35 МГц.
- Максимальная частота сигнала произвольной формы 6,25 МГц.
- Разрешение по частоте 10^{-5} Гц.
- Максимальная частота выборки 100 Мвыб/с.
- Нелинейные искажения при напряжении на выходе 3 В и частоте от 20 Гц до 1 МГц не более -65 дБ.
- Фазовый шум SSB при сдвиге от несущей 1 МГц в 1 Гц не более -118 дБ.
- Выходное напряжение на нагрузке 50 Ом от 1 мВ до 10 В (двойной размах) для АМ сигнала не более 5 В.

- Фильтры НЧ с частотами среза 35, 37 и 75 МГц, тип фильтров Бесселя или Кауэра 9-го порядка.
- Виды модуляции АМ, ЧМ, ФМ, FSK и PSK.
- Режим качания частоты по различному закону.
- Интерфейс связи с ПК USB 1.1.
- Потребляемая от сети 220 В мощность не более 35 Вт.
- Габаритные размеры 219×137×350 мм, масса 6,2 кг.

Как нетрудно заметить, прибор прекрасно приспособлен для генерации синусоидального сигнала высокой частоты. Большинство стандартных сигналов другой формы имеют намного меньшие максимальные частоты генерации, что характерно для большинства моделей подобных генераторов. К достоинствам прибора следует отнести очень простое и удобное управление. Дисплей генератора цветной TFT с размером по диагонали 5,4 дюйма и с разрешением 320×240 пикселей дает хорошее представление о форме генерируемого сигнала и его параметрах. Возможности прибора значительно расширяются при его использовании совместно с ПК.

4.1.6. Генераторы произвольных сигналов фирмы Tabor

Многофункциональные генераторы с прямым синтезом формы сигналов выпускает и Израильская фирма Tabor Electronics Ltd. На наш рынок их поставляет компания "Прист" [129]. Она предлагает серию генераторов сигналов произвольной формы WW5061, WW5062, WW1071, WW1072, WW2571, WW2572, WW1281, внешний вид которых показан на рис. 4.5; выпускаются одноканальные и двухканальные генераторы серии WW. На генераторы дается гарантия 5 лет!

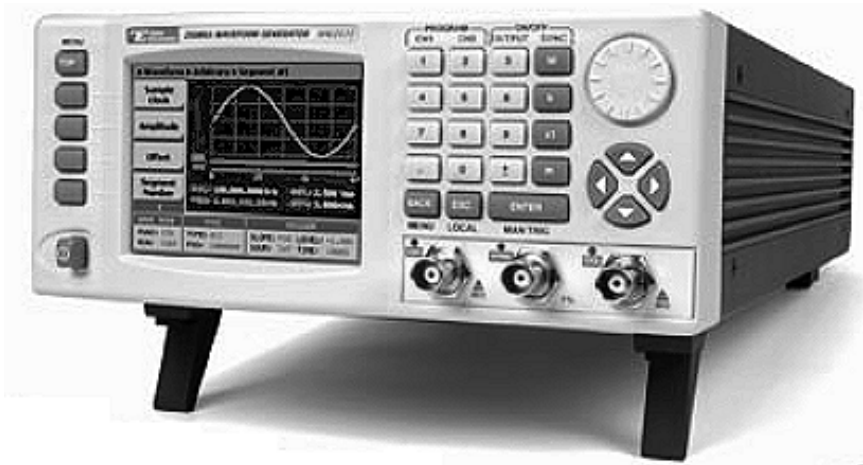


Рис. 4.5. Внешний вид генераторов серии WW фирмы Tabor

Краткие технические данные генераторов:

- Диапазон частот (синус, меандр): 0,1 мГц... 25 МГц/50 МГц/100 МГц; 50 Гц... 400 МГц (WW1281).
- Расширенный диапазон частот для сигналов произвольной формы.
- 1 (WW1281) или 2 выходных канала.
- Разрядность ЦАП 12, 14 или 16 битов.
- Амплитуда 2; 10; 16 Впик на нагрузке 50 Ом.
- Частота дискретизации 50, 100, 250 МГц; 1,2 ГГц.
- Память для формирования сигнала от 0,5 до 8 М точек (опция — 16 М).
- Режим последовательного формирования произвольного сигнала из различных сегментов с возможностью циклического повторения сегмента в последовательности.
- Большой цветной ЖК-дисплей (диагональ 3,5 дюймов).
- Стандартные формы сигналов — 10 видов.
- Различные виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМн, ЧМн; ИМ, ГКЧ; 3D; IQ.
- Параллельный 16-битный выход (WW257х) и 2 выхода последовательных цифровых потоков (WW1281).
- ПО ArbConnection для формирования сигнала произвольной формы.
- Поддержка синхронной работы нескольких генераторов.
- Интерфейсы ДУ: USB, LAN, GPIB.

По ряду параметров приборы этой фирмы превосходят генераторы, выпускаемые другими фирмами — за исключением генераторов корпорации Tektronix, описанных ниже. Генераторы фирмы Taboг прекрасно подходят для испытания современного связанного и телекоммуникационного оборудования, требующего сложных тестовых сигналов. Они прекрасно приспособлены для встраивания в компьютеризированные измерительные системы, в том числе производственного назначения.

4.2. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000

4.2.1. Внешний вид и органы управления генератора AFG3000

Корпорация Tektronix — один из лидеров в области разработки и производства высококачественных измерительных приборов недавно выпустила на рынок серию многофункциональных генераторов произвольных сигналов AFG3000. Ныне новая серия представлена шестью моделями: AFG3021, AFG3022, AFG3101, AFG3102, AFG3251,

AFG3252. Буквы AFG являются сокращениями слов Arbitrary Function Generator (Генератор Произвольных Функций).

Последняя цифра в названии приборов указывает на число каналов: 1 — одноканальные приборы и 2 — двухканальные. Двухканальные генераторы способны формировать независимые сигналы по обоим каналам, в том числе и синхронные (например, дифференциальные). Две средние цифры приблизительно указывают на максимальную частоту генерации синусоидальных сигналов: 02—25 МГц, 10—100 МГц и 25—240 МГц. Минимальное значение частоты 0,001 Гц (1 мГц). Приборы используют новейшие методы генерации множества сигналов с помощью одной СБИС и методы прямого цифрового синтеза частот, обеспечивая при этом максимальную нестабильность частот выходных сигналов не более $1 \cdot 10^{-6}$ (или 0,0001%) за год работы и при изменении температуры от 0 до +50° С. Время самопрогрева при этом составляет 20 минут.

Генераторы AFG3000 являются комбинацией функционального генератора (генератора стандартных функций), программируемого генератора сигналов произвольной формы и генератора импульсов с регулируемой длительностью фронтов. Но фактически они сочетают в себе функции множества устройств, нередко выпускаемых как отдельные приборы:

- высокостабильного широкодиапазонного генератора синусоидального сигнала с несколькими видами модуляции;
- генератора прямоугольных и пилообразных импульсов с изменяемым в широких пределах коэффициентом заполнения и различными видами модуляции;
- функционального генератора сигналов с рядом математически заданных зависимостей;
- программируемого генератора сигналов произвольной (заданной пользователем) формы;
- генератора шума, который можно добавлять к другим сигналам;
- генератора трапецеидальных импульсов с отдельно регулируемыми длительностями полочки фронтов;
- генератора качающейся частоты.

Внешний вид генераторов серии показан на рис. 4.6. Приборы выполнены в небольшом корпусе (для настольной конфигурации он имеет высоту 156,3 мм, ширину 329,6 мм и глубину 168,0 мм). Масса прибора 4,5 кг, в упаковке — 5,9 кг. Диапазон рабочих температур от 0 до +50° С, температура хранения от —30 до +70° С. Охлаждение прибора активное с помощью вентилятора на правой боковой стенке. В связи с этим закрывать боковые стенки нельзя, по обе стороны от них нужно иметь не менее 5 см свободного пространства. Необходимо заземление прибора (клемма на задней стенке).

Генераторы имеют самый современный, простой и наглядный интерфейс (рис. 4.7), подобный интерфейсу современных цифровых осциллографов. Большой жидкокристаллический цветной дисплей (только у модели AFG3021 он черно-белый) с размером по диагонали 5,6 дюйма отображает крупными знаками основные параметры сигнала.

лов и режимы работы генераторов и представляет форму создаваемых сигналов. Генератор имеет интерфейс на 8 языках, включая русский. Для изменения языка надписей на передней панели поставляется наклейка, которая крепится на передней панели.

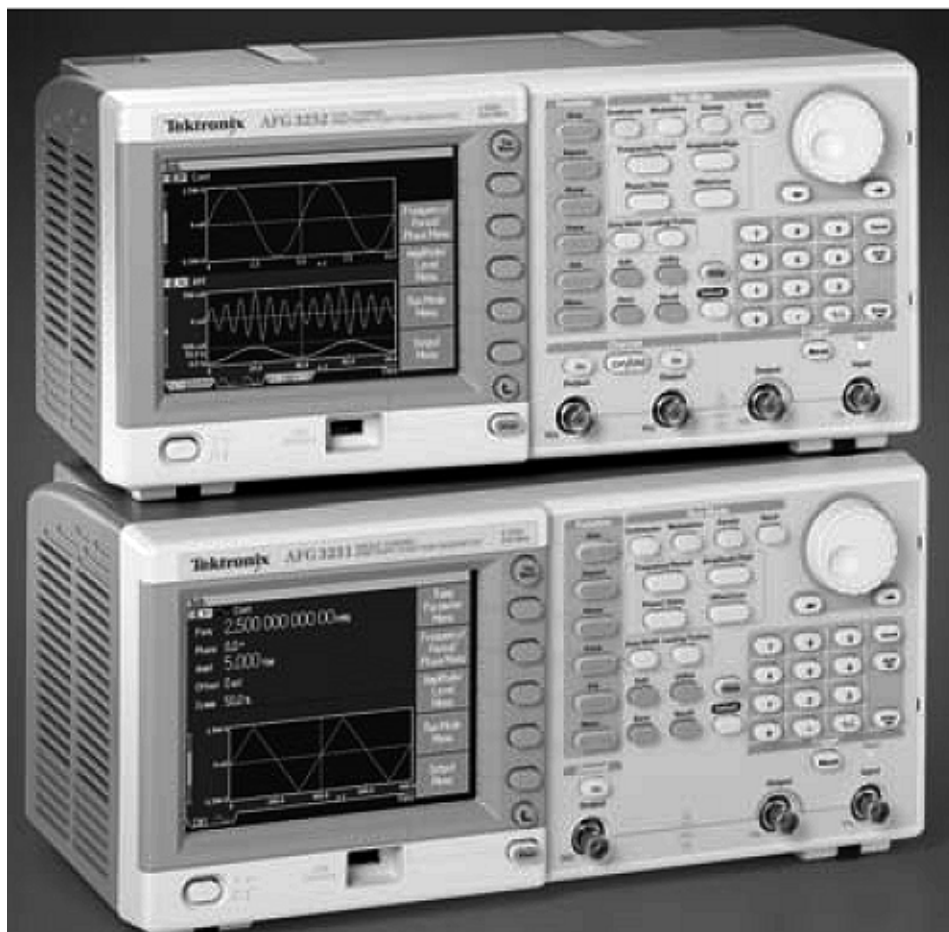


Рис. 4.6. Внешний вид генераторов серии AFG3000 (сверху — двухканальный генератор, снизу — одноканальный генератор)

Вид задней панели генератора представлен на рис. 4.8. На задней панели расположены защитный порт Security Port, гнездо заземления, разъем сигнала, добавляемого к основному сигналу, ADD INPUT, разъемы внешней модуляции сигналов EXT MODULATION CH1/CH2, входной EXT REF INPUT и выходной EXT REF OUTPUT разъемы опорной (эталонной) частоты. Все эти разъемы стандартные коаксиальные типа BNC. Кроме того, имеются разъемы для подключения к линии USB, сети LAN и порта GPIB, используемого для управления измерительными приборами. Есть также зажим заземления и гнездо для подключения сетевого кабеля с земляным выводом.

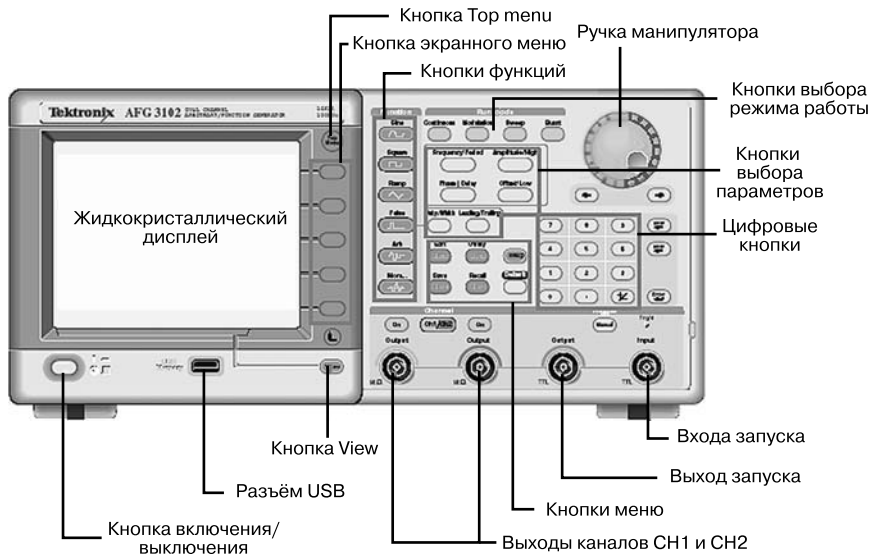


Рис. 4.7. Передняя панель генератора серии AFG3000 и основные органы управления

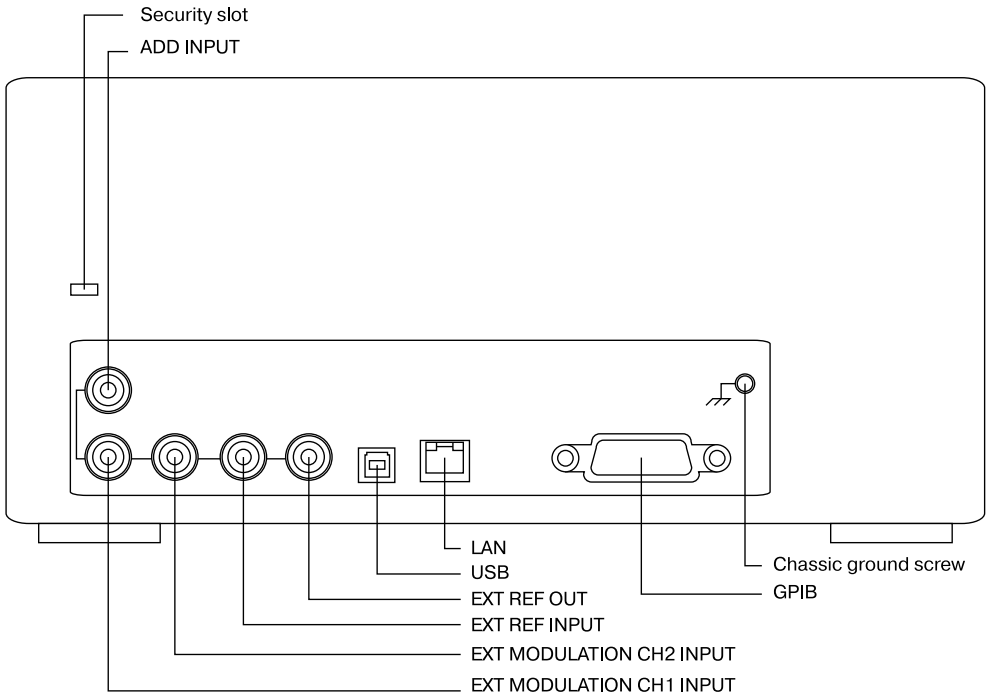


Рис. 4.8. Задняя панель генератора серии AFG3000 (начиная с модели AFG3101)

4.2.2. Технические характеристики генераторов AFG3000

Основные технические характеристики разных моделей генераторов серии AFG3000 даны на рис. 4.9. Приборы отличаются числом каналов (1 или 2), максимальной частотой синусоидального напряжения (25, 100 и 240 МГц) и вдвое более низкой частотой импульсного напряжения (прямоугольного и пилообразного). Импульсы с дополнительными формами можно формировать в диапазоне частот от 1 мГц до 1 МГц.

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ПАРАМЕТРЫ	AFG3021/AFG3022	AFG3101/AFG3102	AFG3251/AFG3252
ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Количество каналов	1/2	1/2	1/2
	Виды выходного сигнала	Синус, меандр, импульс, пила, треугольник, Sin x/n, нарастающая и спадающая экспонента, функции Гаусса, Лоренца, Хевисайда, шум		
	Выходной уровень на нагрузке 50 Ом	10 мВ – 10 В	20 мВ – 10 В	50 мВ – 5 В (до 200 МГц) 50 мВ – 4 В (свыше 200 МГц)
	Погрешность установки частоты	$(\pm 1 \cdot 10^{-6})$		
	Постоянное смещение	± 5 Впик (AC+DC)	± 5 Впик (AC+DC)	$\pm 2,5$ Впик (AC+DC)
СИНУСОИДА	Частотный диапазон	1 мГц - 25 МГц	1 мГц – 100 МГц	1 мГц – 240 МГц
	Погрешность установки уровня на 1 кГц	$\pm(1\% + 1 \text{ мВ})$		
	Неравномерность АЧХ	$\pm 0,15$ дБ до 5 МГц $\pm 0,3$ дБ до 20 МГц $\pm 0,5$ дБ до 25 МГц	$\pm 0,15$ дБ до 5 МГц $\pm 0,3$ дБ до 25 МГц $\pm 0,5$ дБ до 100 МГц	$\pm 0,15$ дБ до 5 МГц $\pm 0,3$ дБ до 25 МГц $\pm 0,5$ дБ до 100 МГц $\pm 1,0$ дБ до 200 МГц
	Коэффициент гармоник (выходной сигнал 1 В)	≤ -70 дБн до 20 кГц < -60 дБн до 1 МГц < -50 дБн до 10 МГц < -40 до 25 МГц	≤ -60 дБн до 20 кГц < -60 дБн до 1 МГц < -37 дБн до 100 МГц	≤ -60 дБн до 20 кГц < -60 дБн до 1 МГц < -50 дБн до 5 МГц < -37 дБн до 25 МГц < -30 дБн до 240 МГц
МЕАНДР	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Время нараст./спада	18 нс	5 нс	2,5 нс
ИМПУЛЬС	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Длительность	30 нс – 999 с	8 нс – 999 с	4 нс – 999 с
	Перестраиваемое время нарастания	18 нс – 625 с	5 нс – 625 с	2,5 нс – 625 с
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ	Диапазон частот	1 мГц – 250 кГц	1 мГц – 1 МГц	1 мГц – 2,4 МГц
	Полоса шумового сигнала	25 МГц	100 МГц	240 МГц
ПРОИЗВОЛЬНАЯ ФОРМА	Диапазон частот	1 мГц – 12,5 МГц	1 мГц – 50 МГц	1 мГц – 120 МГц
	Частота дискретизации и объем памяти	250 МГц; 2...64 кБ	250 МГц; 16...128 кБ 1 ГГц; 2...16 кБ	250 МГц; 16...128 кБ 2 ГГц; 2...16 кБ
	Разрешение по вертикали	14 бит		
МОДУЛЯЦИЯ	Виды модуляции	АМ (0-120%), ЧМ (девиация до 120 МГц), ФМ (0-180°), ЧМн, модуляция длительности импульса (0-50% от периода), ИМ, ГКЧ (линейное/логарифмическое, время качания 10 мс – 100 с)		
	Несущая Модулирующая	Все виды сигналов, исключая импульс, шум и постоянное напряжение Частота: 2 мГц – 50 кГц. Синус, меандр, пила, шум, произвольный сигнал.		
ОБЩИЕ ДАННЫЕ	Напряжение питания	220 В ($\pm 15\%$), 50 / 60 Гц		
	Габаритные размеры	156 x 329 x 188 мм		
	Масса	4,5 кг		
	Комплект поставки	Сетевой шнур (1), руководство по эксплуатации, ПО		

Рис. 4.9. Основные характеристики генераторов серии AFG3000

С новой прошивкой генераторы имеют минимальные частоты, в 1 000 раз меньше — 1 мкГц, и соответственно частотное разрешение в 1 мкГц. Кроме того, значительно расширены пределы изменения скважности импульсов и других зависящих от частотного разрешения параметров.

4.2.3. Работа с генератором AFG3000

Управление генератором, в основном, кнопочное, но есть и удобная поворотная ручка универсального манипулятора с кнопками направления (в правом верхнем углу передней панели). Эти кнопки используются для перемещения по разряду числа того или иного параметра, например, частоты, после чего поворотная ручка позволяет быстро менять с выбранным разрядом число, увеличивая его или уменьшая. Пример: частота 20.0000000000 МГц — частота 20 МГц, меняется изменением десятых долей МГц. Это очень удобно при имитации плавного изменения того или иного параметра.

У генераторов есть возможность установки языка интерфейса, в том числе на русский язык. Кроме того, к генераторам прилагается наклейка на переднюю панель с русскоязычными надписями. Есть и русскоязычная встроенная справка, и русскоязычное руководство по работе с приборами. Таким образом, локализация приборов под рынок России имеет комплексный и вполне законченный характер.

Кнопки на передней панели образуют ряд характерных групп, выделенных на рис. 4.7. Из них важнейшей является верхняя горизонтальная группа кнопок "Режим работы", задающих следующие режимы работы (запуска):

- Непрерывный — установка непрерывного режима работы.
- Модуляция — задание типа модуляции (АМ — амплитудная, ЧМ — частотная, ФМ — фазовая, ЧМн — частотная манипуляция и ШИМ — широтно-импульсная).
- Качание — качание частоты сигналов.
- Пачка — генерация пачек сигналов.

Вертикальная группа кнопок "Функции" в центре передней панели задает выбор формы сигналов:

- Синус — синусоидальный сигнал.
- Прямоугольн. — прямоугольные импульсы типа "меандр".
- Пилообразн. — пилообразные импульсы.
- Импульсн. — импульсы с регулируемой длительностью фронтов.
- Произвольн. — сигналы с произвольной, задаваемой пользователем, формой.
- Еще... — выбор из экранного меню сигналов стандартной формы.

Под этой группой кнопок расположены кнопка переключения каналов и кнопки Chanel On включения выходов. У одноканальных приборов эта кнопка одна, кнопка переключения каналов отсутствует и есть выход только одного канала. В центре передней панели расположены три группы кнопок, не имеющих общего названия. Они служат для оперативной (без поиска по меню) установки сразу основных параметров сигналов. Первая группа содержит следующие кнопки:

- Частота/Период — установка частоты и периода сигналов.
- Фаза/Задержка — установка фазы и временной задержки сигналов.
- Амплитуда/Верхний — установка амплитуды и верхнего предела сигналов.

- Смещение/Нижний — установка смещения и нижнего предела сигналов.

Вторая группа содержит две кнопки:

- Коэфф. заплн./Длитель. — установка коэффициента заполнения и длительности сигналов.
- Пер. фронт/Зад. фронт — установка длительности переднего и заднего фронтов сигналов.

Третья группа кнопок (нижняя) содержит шесть кнопок:

- Правка — включение меню правки.
- Сервис — включение меню сервисных операций.
- Help (надпись только на кнопке) — вызов справки.
- Сохранить — вызов окна сохранения настроек и форм сигналов.
- Вызвать — вызов окна загрузки настроек и форм сигналов.
- По умолч. — включение настроек по умолчанию.

Под поворотной ручкой универсального манипулятора расположены кнопки со стрелками ← и → перемещения выделенных символов параметров. Группа кнопок Trigger содержит цифровые кнопки прямого ввода значений параметров и кнопки Cancel, Back и Enter, названия которых не русифицированы, но вполне очевидны и привычны. Под этой группой кнопок есть кнопка меню Menu и разъемы выхода Output синхросигнала и входа Input.

Под экраном дисплея имеются следующие органы: включения прибора, гнездо для вставки USB-модуля флэш-памяти и кнопка обзора View. В правой области дисплея имеются пять кнопок управления контекстным меню, кнопка вызова основного меню Top menu и кнопка возврата.

Работа с прибором сводится к установке режима работы (по умолчанию это непрерывный режим) и вида генерируемого сигнала (по умолчанию синусоидальный). После этого с помощью кнопок контекстного меню или кнопок установки параметров задаются и контролируются с помощью дисплея параметры генерируемого сигнала (рис. 4.10). Их установка осуществляется группой цифровых кнопок или вращением ручки универсального манипулятора.

В целом надо отметить, что интерфейс пользователя у генераторов очень прост и интуитивно понятен. Поэтому детально описывать работу с генератором нет необходимости. Тем более что такое описание есть в прилагаемой инструкции по применению (поставляемые в Россию генераторы имеют такую инструкцию на русском языке).

4.2.4. Основные возможности генераторов AFG3101

Рассмотрим основные возможности одноканальных генераторов AFG3101 для основных видов генерируемых сигналов. Для более полного их представления они иллюст-

рируются реальными осциллограммами, полученными с помощью цифрового 250 МГц осциллографа DS-1250 фирмы EZ Digital.

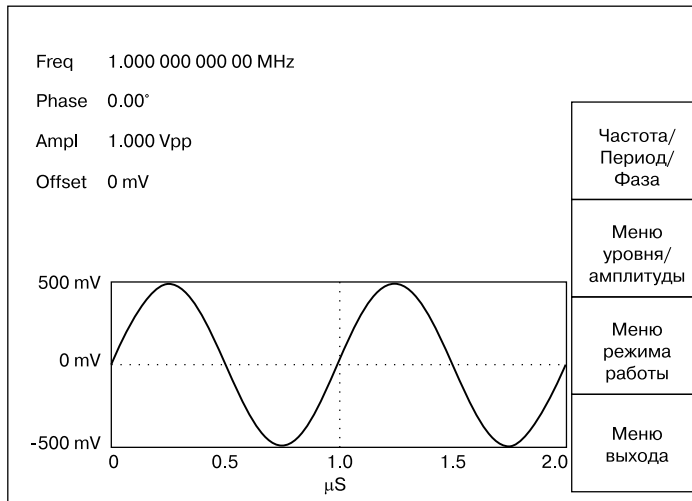


Рис. 4.10. Дисплей генератора серии AFG3101

Сразу отметим, что основные выходы (или выход в одноканальной модели) изолированы от земли приборов, так что генератор может использоваться как "подвешенный" источник сигналов (или как два источника с общей внутренней землей в двухканальных генераторах). Максимальное напряжение (постоянное плюс импульсное) относительно его внутренней земли не должно превышать ± 42 В. Возможно изменение фазы синусоидального сигнала от $-180,00^\circ$ до $+180,00^\circ$ и осуществление амплитудной, частотной и фазовой модуляции, а также частотной манипуляции. Для импульсных сигналов возможна еще и широтно-импульсная модуляция, которая широко используется в преобразовательных устройствах для управления мощностью в нагрузке, например для изменения яркости свечения светодиодов или изменения температуры нагрева нагревателей в электрических печах.

В качестве генератора синусоидальных сигналов AFG3000 генерируют такие сигналы с частотой от 0,001 Гц (1 мГц) до 25, 100 или 240 МГц. Этот диапазон намного перекрывает диапазон частот звуковых генераторов и обычных аналоговых ВЧ-генераторов стандартных сигналов старых аналоговых моделей. Недавно корпорация Terntonix выставила на своем интернет-сайте обновление микропрограммного обеспечения генераторов серии AFG3000. При этом разрешение по частотно-временным параметрам сигналов повышено на три порядка по сравнению с указанным! Например, минимальная частота и разрешение по частоте и периоду синусоидального сигнала стали равными 1 мкГц (0,000001 Гц). Это открывает новые возможности в отладке и тестировании сверхнизкочастотных линейных устройств и систем и устройств с острыми резонансными кривыми (например, кварцевых резонаторов и фильтров). Однако ниже приведены данные генераторов с начальной прошивкой.

На рис. 4.11 представлены осциллограммы сигналов на основном выходе и на выходе TTL при установке частоты 5 МГц. Форма синусоиды безупречна, а сигнал на выходе TTL близок к прямоугольному. Следует учитывать, что только до частоты основного сигнала в 4,9 МГц он имеет одинаковую с ним частоту. Так, уже на частоте 5 МГц (рис. 4.11) виден эффект деления частоты формирователя TTL-сигнала. Понижение частоты TTL-сигнала облегчает синхронизацию им большинство осциллографов.

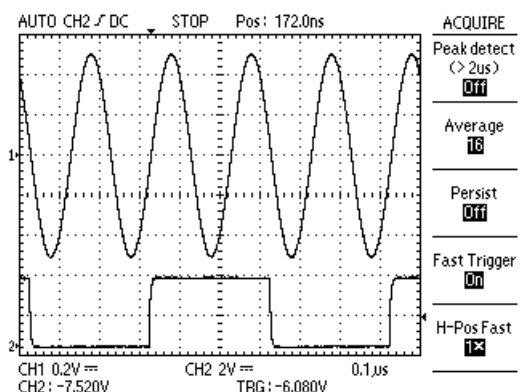


Рис. 4.11. Осциллограммы сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте основного сигнала 5 МГц

У AFG3000 на частотах до 20 кГц коэффициент гармоник не превышает 0,2%, что является очень малым значением для генераторов такого класса и гораздо меньшим, чем у большинства аналоговых функциональных генераторов. На более высоких частотах при двойной амплитуде выходного сигнала 1 В уровень подавления паразитных составляющих у первых четырех моделей генераторов более 60 дБ на частотах до 1 МГц, 50 дБ на частотах от 1 до 25 МГц и 50 дБ на частотах от 25 до 100 МГц.

На рис. 4.12 показана осциллограмма синусоидального напряжения с частотой 100 МГц — максимальной для AFG-3101. На глаз никаких искажений синусоиды не заметно и в этом случае. Обратите внимание на то, что на выходе TTL сигнал пропадает. Это предусмотрено на частотах выше 50 МГц. Выход TTL рассчитан на нагрузку 1 кОм и имеет выходное сопротивление 50 Ом.

Двойная амплитуда синусоидального напряжения (кстати, как и напряжения других форм) на нагрузке 50 Ом может изменяться от 10, 20 и 50 мВ для групп генераторов, представленных на рис. 4.9, до 10 В (и 5 В у приборов AFG3251/3252). Это обстоятельство является одним из немногих недостатков генератора — его нельзя использовать в качестве генератора сигналов малой амплитуды без применения внешних делителей напряжения (аттенюаторов). Установка амплитуды производится с разрешением в 0,1 мВ. Возможна установка уровня как двойной амплитуды, так и среднеквадратичного значения и уровня мощности в дБ. Предусмотрена работа на нагрузку 50 Ом и на высокоомную нагрузку, причем в последнем случае предельный уровень напряжения удваивается. Предусмотрено смещение выходного сигнала по постоянному уровню в пределах его

размаха и с разрешением в 1 мВ. Погрешность установления уровня и смещения около 1% (более точные значения указаны в фирменной спецификации).

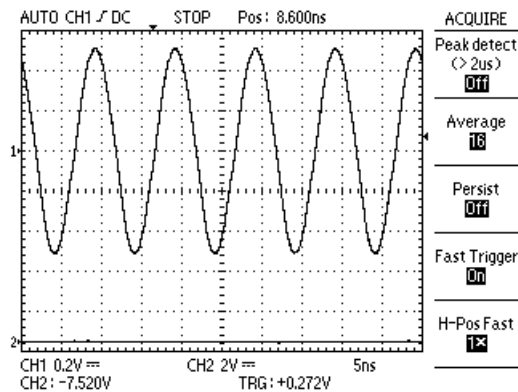


Рис. 4.12. Осциллограмма сигнала на основном выходе на частоте 100 МГц

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) генераторов при уровне двойной амплитуды в 1 В мала. Для всех генераторов она характеризуется следующими данными (в пределах указанного диапазона частот для каждой модели):

Диапазон частот, МГц	<5	5–20	20–100	100–200
Неравномерность АЧХ, дБ	±0,15	±0,3	±0,5	±1,0

Как уже отмечалось, для некоторых видов сигналов (за исключением шума и постоянного тока) возможна модуляция по амплитуде, частоте и фазе. Возможна также частотная манипуляция. На рис. 4.13 представлены осциллограммы на основном выходе и выходе синхронизации для случая амплитудной модуляции синусоидального ВЧ-сигнала синусоидальным НЧ-сигналом. Отчетливо видно изменение амплитуды по синусоидальному закону. При амплитудной модуляции она возможна с коэффициентом модуляции от 0 до 120% (значения свыше 100% означает уже перемодуляцию). Сигнал на TTL-выходе в этом случае имеет форму прямоугольных импульсов с частотой, равной частоте модуляции.

Частотная модуляция также возможна (рис. 4.14). Как и при амплитудной модуляции, частотная модуляция может осуществляться разными видами сигналов: синусоидальным, прямоугольным, импульсным, шумом и произвольным. Модулируемые сигналы могут иметь любой вид, кроме импульсного, шума и постоянного тока. Частота внутренней модуляции может быть от 2 МГц до 50 кГц. При частотной модуляции пиковое отклонение частоты составляет половину максимально возможной частоты синусоидального сигнала.

Фазовая модуляция означает изменение фазового сдвига несущего колебания. Диапазон сдвигов от 0 до 180 градусов с установкой через 0,1 градуса. Диапазон частот модуляции тот же, что при частотной модуляции. Наконец, частотная манипуляция возможна с частотой от 2 МГц до 1 МГц.

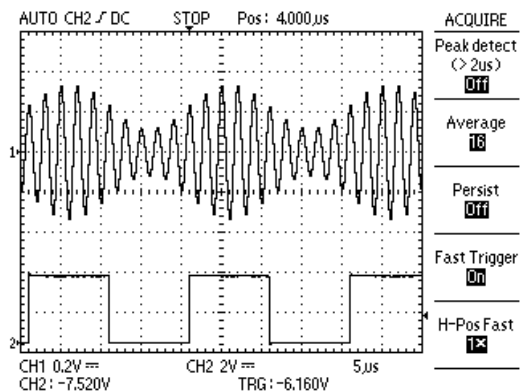


Рис. 4.13. Иллюстрация получения амплитудно-модулированного сигнала

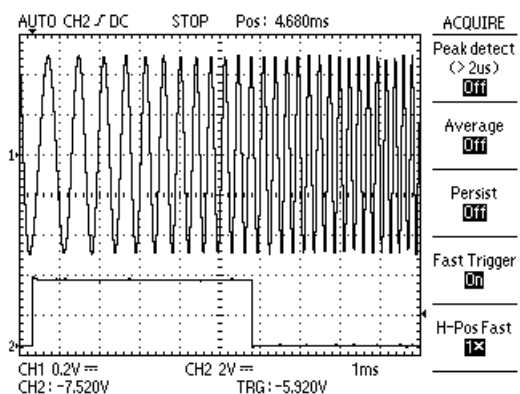


Рис. 4.14. Иллюстрация получения частотно-модулированного сигнала

Рассмотрим коротко возможности генераторов AFG3000 в генерации других форм сигналов. Прямоугольные импульсы по умолчанию генерируются с коэффициентом заполнения 50% (тип импульсов — меандр). Разумеется, даже на частотах выше 1 МГц трудно рассчитывать на идеальную прямоугольную форму таких импульсов. На рис. 4.15 показаны осциллограммы прямоугольных импульсов с частотой 10 МГц. Видна конечная длительность фронтов (10, 5 и 2,5 нс для генераторов с максимальной частотой повторения прямоугольных импульсов 120, 50 и 12,5 МГц).

Неожиданным оказалось испытание генераторов AFG3000 в режиме генерации пилообразных сигналов. В большинстве даже дешевых функциональных генераторов частота таких сигналов равна частоте синусоидальных и прямоугольных сигналов или немного ниже. Однако испытание показало, что пилообразные (по умолчанию треугольные) сигналы генератор AFG3101 генерирует только до частот в 1 МГц (рис. 4.16). Изучение англоязычной документации подтвердило этот результат: в этой документации (в отличие от русскоязычной) говорится, что до частоты 50 МГц (для AFG3101) возможна генерация сигналов только типа Square и Pulse (прямоугольный и импульс-

ный). Что касается пилообразного сигнала Ramp, то он отнесен к группе специальных сигналов, для которой явно указана предельная частота в 1 МГц. Чуть позже будет отмечена возможность преодоления этого ограничения.

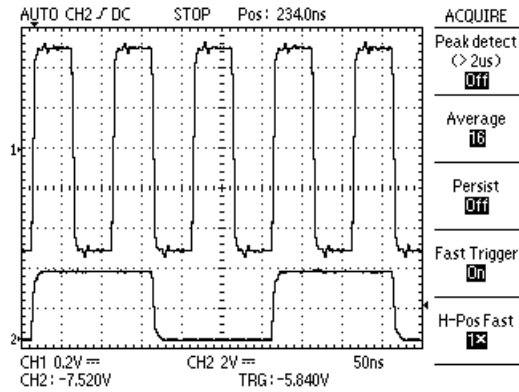


Рис. 4.15. Осциллограммы прямоугольных импульсов на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте основного сигнала 10 МГц

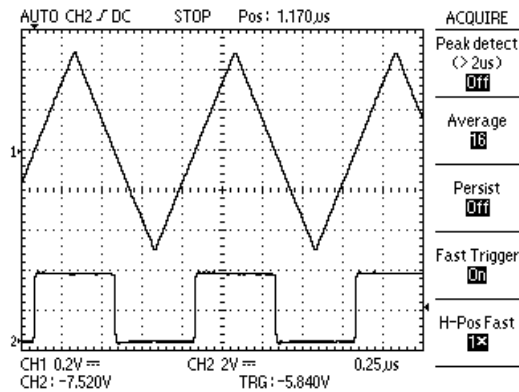


Рис. 4.16. Осциллограммы пилообразных импульсов на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте основного сигнала 1 МГц

Весьма эффективным является применение генераторов AFG3000 в качестве генераторов импульсов. Здесь реализуются частоты от 1 МГц до частот, равных половине частоты повторения синусоидальных сигналов (до 50 МГц у AFG3101/3102 и даже 120 МГц у AGF3251/3252). В пределах возможных определений можно менять не только частоту (или период повторения) импульсов, но и времена нарастания и спада и активную длительность. Таким образом, в общем случае генерируются импульсы трапецеидальной формы (рис. 4.17). Минимальная длительность фронтов импульсов у генераторов серии AFG3000 составляет 18, 5 и 2,5 нс. Минимальная длительность импульсов 30, 8 и 4 нс, максимальная длительность у всех моделей 999 с.

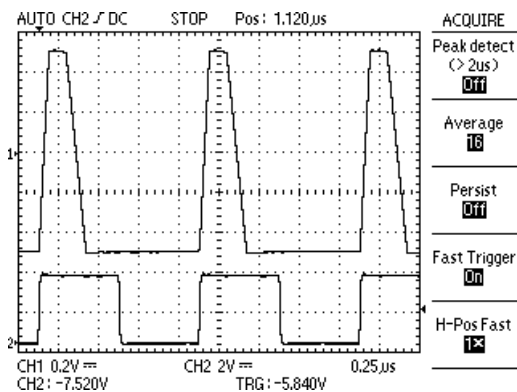


Рис. 4.17. Осциллограммы трапецидальных импульсов на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте 1 МГц

Большую группу сигналов, генерируемых генераторами AFG3000 можно отнести к разряду сигналов, воспроизводящих математические функции. Это уже упомянутый пилообразный сигнал, сигнал вида $\sin(x)/x$, функция Гаусса, функция Лоренца, экспонента нарастающая, экспонента падающая (тут снова определения неточны — речь идет просто о перепадах с экспоненциальным спадом положительной и отрицательной полярности) и гаверсинус. Все эти сигналы, за исключением пилообразного, выбираются из позиции меню Еще... в меню функций. Они генерируются с частотами от 1 мГц до 1 МГц. На рис. 4.18 представлены осциллограммы сигнала, реализующего функцию Гаусса. Показано три периода сигнала на основном выходе и на выходе TTL. Они синхронны и имеют одинаковую частоту.

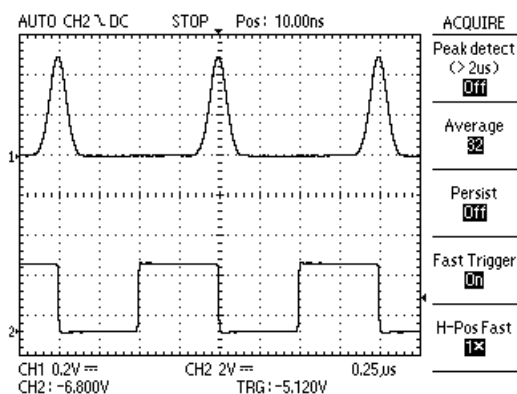


Рис. 4.18. Осциллограммы сигнала с функцией Гаусса на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте 1 МГц

Есть два особых вида сигналов: постоянное напряжение (ток) и шумы. "Сигнал" постоянного напряжения настолько тривиален, что в особых иллюстрациях не нуждается. Шум — куда более полезный сигнал (рис. 4.19), который часто используется для

проведения измерений, например, радиоприемной аппаратуры. В описании генератора вскользь упоминается, что шум имеет закон распределения Гаусса.

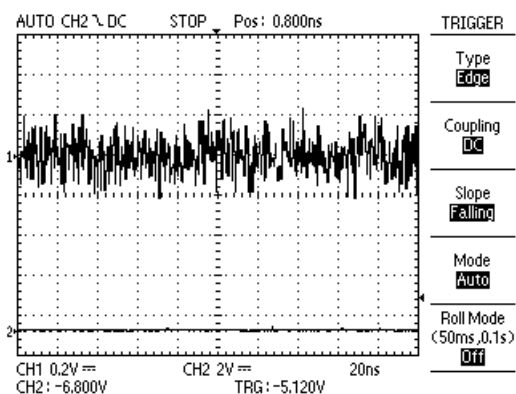


Рис. 4.19. Осциллограммы шумового сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте 1 МГц

У шума и сигнала постоянного тока нет строгого понятия амплитуды, частоты и фазы. Поэтому естественно, что они не могут модулироваться по этим параметрам, хотя шум может модулировать другие сигналы. Полезно отметить, что возможно добавление шума к другим сигналам и моделирование, таким образом, зашумленных сигналов. Заодно отметим, что на задней стенке генераторов (кроме AGF3021/3022) есть разъем ADD INPUT, на который можно подать любой сигнал, который можно сложить с основным сигналом.

Как уже отмечалось, все эти сигналы генерируются с частотами от 1 МГц до всего в 1 МГц. Тут самый раз "закинуть камешек в огород Tektronix", вспомнив, что многие (даже дешевые) функциональные генераторы генерируют треугольные и пилообразные сигналы с частотами до 10–20 МГц! Но не будем спешить с этим. Учтем два важных обстоятельства. Во-первых, 1 МГц сигналы — это все сигналы математических функций. Сложно представить, чтобы какой-либо генератор вообще обеспечивал точное соответствие этих сигналов функциям в существенно более широком диапазоне частот. К примеру, практически у всех генераторов треугольных сигналов на предельных частотах в 10–20 МГц даже на глаз видны округления верхушек импульсов. Видимо, поэтому Tektronix ограничила частоту сигналов с математическими функциональными зависимостями значением в 1 МГц. А во-вторых, главный сюрприз нас ждет впереди!

Всего генераторы серии AFG3000 имеют 12 стандартных форм сигналов. Все они полезны и позволяют использовать генераторы для самых разнообразных сервисных, научных и учебных целей. Однако в полной мере уникальные возможности генераторов проявляются в режиме генерации сигналов произвольной формы — меню и кнопка Произвольн. (в оригинале Arb.) функций (см. рис. 4.7).

А вот теперь мы дошли и до обещанного сюрприза — полоса частот для произвольных сигналов нормируется до 25, 100 и даже 240 МГц у генераторов трех групп, отмеченных выше (см. рис. 4.9)! При этом созданный сигнал имеет разрядность 14 бит, а

частота его дискретизации составляет до 1 Гвыб/с у генераторов AFG3101/3102 и даже 2,5 Гвыб/с у AFG3251/3252. И никто нам не мешает в качестве такого сигнала воспользоваться образцом сигнала любой формы!

Для хранения созданных пользователем сигналов есть два вида памяти — встроенная и внешняя. Встроенная память позволяет создать 5 файлов, имена которых представлены в окне генератора, показанном на рис. 4.20. Это окно вызывается нажатием кнопки Произвольн. меню функций и выбором позиции Сигнал произвольн. формы экранного меню. В окне представлены имена файлов, хранящихся во внутренней памяти. В позиции экранного меню Память есть возможность выбора окон либо внутренней памяти, либо внешней памяти флэш-карты, которая вставляется в гнездо под экраном.

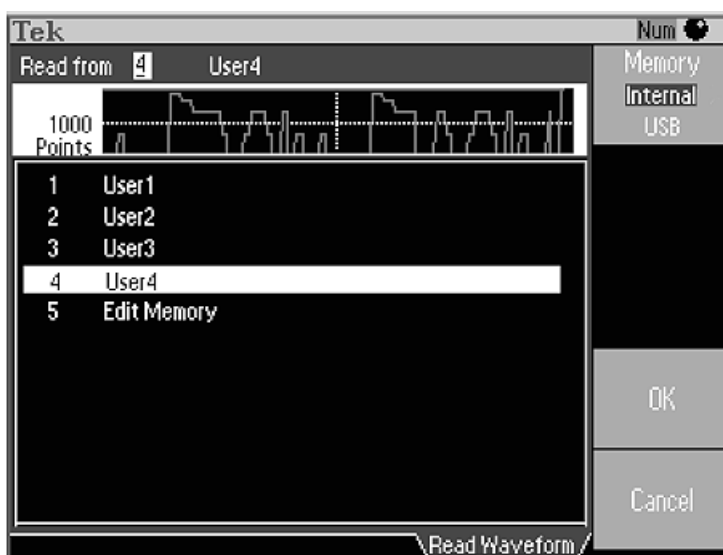


Рис. 4.20. Экран дисплея генератора с окном выбора файла из внутренней памяти

Чтобы проверить возможность генерации произвольного сигнала с высокой частотой, был задан сигнал пилообразной формы в виде двух периодов в кадре произвольного сигнала. Напоминаем, что обычный пилообразный сигнал может иметь частоту повторения максимум в 1 МГц. Осциллограммы нашего сигнала с основной частотой 5 МГц показаны на рис. 4.21. Фактическая частота сигнала равна 10 МГц, поскольку она удваивается. Как видно из рис. 4.21, форма 10 МГц пилы очень даже приличная. Небольшие колебания после резкого спада (обратный ход пилы) вызваны неточным согласованием кабеля с 50-омной нагрузкой. При замене кабеля (длина 75 см) более длинными колебания перемещались в другое место, дальше от спада.

Было интересно проверить, а какова будет форма пилы, если увеличить основную частоту до 50 МГц, а частоту пилы до 100 МГц? Сказано — сделано (см. рис. 4.22)! Можно было ожидать, что пила вырождается в синусоиду, поскольку полоса частот выходного

усилителя у AFG3101 ограничена значением в 100 МГц. Но, как видно из рис. 4.22, даже в таком экстремальном случае выходной сигнал скорее напоминает пилу с заметными искажениями, чем синусоиду.

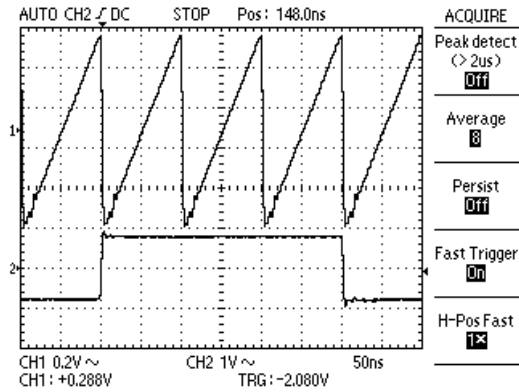


Рис. 4.21. Осциллограммы пилообразного сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте пилы 10 МГц

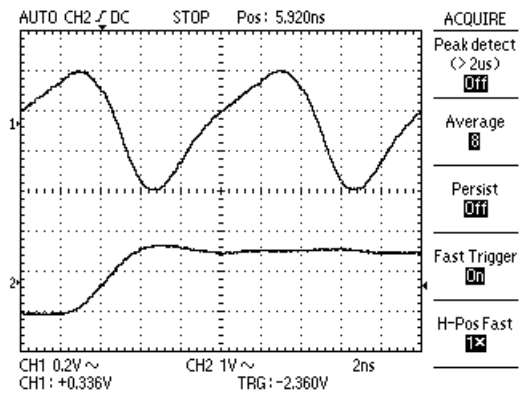


Рис. 4.22. Осциллограммы пилообразного сигнала на основном выходе (верхняя кривая) и выходе запуска (нижняя кривая) при частоте пилы 100 МГц (AFG-3101)

Разумеется, что возможность создания произвольных сигналов означает, что генераторы серии AFG3000 позволяют пользователю создавать большое множество сигналов самой разнообразной формы. Генераторы предусматривают различные возможности создания сигналов произвольной формы — от копирования сигналов стандартных форм, ручного ввода опорных точек и интерполяции кривых в промежутках между ними, до ввода отдельно каждой точки сигналов с разрешением в 14 битов. Это очень высокое разрешение; достаточно отметить, что многие цифровые осциллографы (даже фирмы Tektronix) довольствуются разрешением в 8 битов (это всего 256 значений каждой точки).

Их можно сохранять во внутренней памяти (4 сигнала и текущий редактируемый сигнал), а можно хранить и во внешней флэш-памяти. Это уже вполне современное решение — карту с флэш-памятью можно перенести на компьютер для сохранения файлов не жестком диске большой емкости или для применения в серьезных программах математической обработки сигналов, в том числе с помощью современных систем компьютерной математики Mathcad, Mathematica, Maple или MATLAB. Все это открывает неограниченные возможности моделирования сигналов и использующих их устройств.

Для импульсного сигнала возможна широтно-импульсная модуляция (ШИМ) по различному закону, например линейному или синусоидальному. При этом виде модуляции амплитуда и частота импульсов не меняется, но меняется их коэффициент заполнения. Такая модуляция широко используется в преобразовательных устройствах силовой электроники. На рис. 4.23 показан пример ШИМ для импульсов с частотой 500 кГц при частоте модуляции 50 кГц (диапазон частот модуляции при ШИМ от 2 МГц до 50 кГц) с девиацией 30%. На осциллограмме основного сигнала отчетливо видно изменение коэффициента заполнения импульсов.

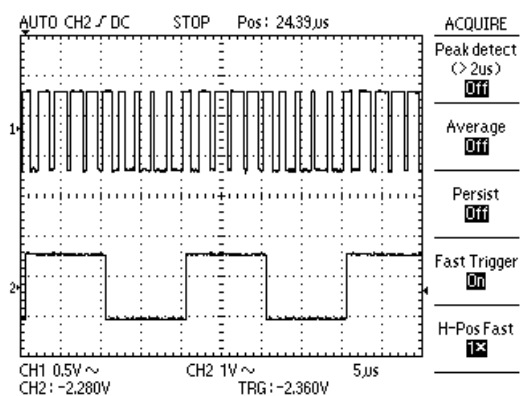


Рис. 4.23. Осциллограммы импульсов при широтно-импульсной модуляции на основном выходе (верхняя кривая) и импульсов на ТТЛ-выходе запуска (нижняя кривая)

Для снятия АЧХ различных устройств и их испытания при изменении частоты сигналов служит режим Качание (кнопка Sweep или Качание). Важно отметить, что качание частоты может осуществляться как для синусоидального, так и для импульсного сигнала, как с применением внутреннего генератора развертки, так и внешнего. Зависимость частоты от времени представлена на рис. 4.24. Все указанные на этом рисунке временные и частотные параметры можно задавать в экранном меню. Кроме того, можно задать качание частоты по линейному или логарифмическому закону. Последнее нужно при снятии логарифмических АЧХ — ЛАЧХ. По уже указанным причинам нельзя использовать этот режим (свип-генератора) для сигналов постоянного тока и шума.

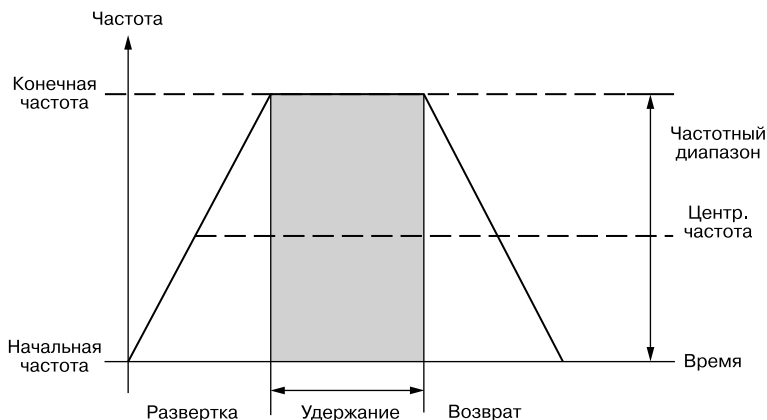


Рис. 4.24. Зависимость частоты от времени в режиме качания (сweep-генератора)

В заключение обзора возможностей генераторов стоит остановиться на еще одной интересной возможности приборов — формировании пачек сигналов различной формы. Для задания такого режима работы служит кнопка Пачка. Можно изменять число сигналов в пачке от 1 до 1 000 000. Возможна также непрерывная генерация заданной пачки. На рис. 4.25 показан пример генерации пачки из 5 пилообразных импульсов. Пачка может стробироваться как от внутреннего генератора импульсов, что и показано на рис. 4.25, так и от внешнего генератора, выход которого подключается к входу Input на передней панели генератора AFG3000.

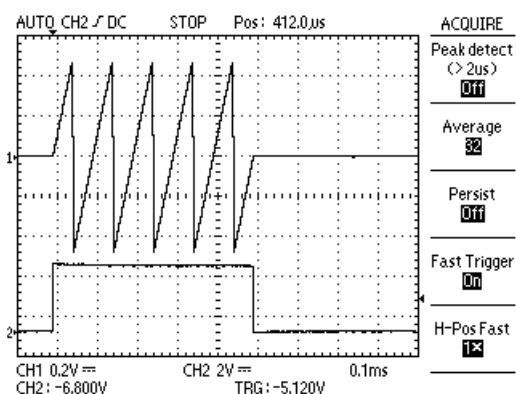


Рис. 4.25. Осциллограммы пачки пилообразных импульсов на основном выходе (верхняя кривая) и импульсов на ТТЛ-выходе запуска (нижняя кривая)

Отметим еще несколько аппаратных возможностей генераторов AFG3000. Их можно использовать в качестве генераторов опорного высокостабильного сигнала с частотой 10 МГц. Можно, напротив, обеспечить работу генератора от внешнего сигнала с частотой 10 МГц (область захвата при этом равна ± 35 кГц). Несколько генераторов могут работать синхронно. Как уже отмечалось, есть возможность суммирования выходных

сигналов с внешним сигналом. Для защиты основного выхода от коротких замыканий и перегрузок по напряжению имеется встроенная защита и внутренний плавкий предохранитель. Однако его замена требует обращения в сервисный центр Tektronix при фирме "Эликс". Рекомендуется использовать внешний переходник с плавким предохранителем, который пользователь может менять самостоятельно.

4.2.5. Основные возможности генераторов AFG3251/3252

Генераторы AFG3251 и AFG3262 являются одно- и двухканальными генераторами с повышенными частотами генерации сигналов. Так, максимальная частота генерации синусоидальных сигналов у них достигает 240 МГц, а меандра и импульсного сигнала до 120 МГц. Однако, поскольку времена нарастания и спада у меандра и импульсов составляют 2,5 нс, то на максимальной частоте генерации сигналы меандра и импульсов теряют четкую форму и превращаются в искаженную синусоиду.

Для полноценной оценки формы сигналов этих генераторов 250 МГц цифрового осциллографа уже недостаточно. В связи с этим для просмотра формы сигналов генераторов AFG3251 и AFG3252 необходимы более широкополосные осциллографы, например серии Tektronix TDS 7000.

Особенностью двухканальных моделей генераторов, например AFG3252, является независимая генерация двух любых сигналов — по одному в каждом канале. Это иллюстрирует рис. 4.26, полученный осциллографом TDS 7000. В одном канале представлен синусоидальный сигнал, а во втором — треугольный. Кроме того, внизу показана осциллограмма прямоугольных импульсов с выхода ТТЛ-сигнала.

Осциллографы TDS 7000 наряду с обычными осциллограммами (см. примеры ниже) позволяют использовать осциллограммы, полученные в режиме применения так называемого "цифрового фосфора" — цифровой имитации послесвечения экрана электронно-лучевой трубки. Именно этот режим использован при получении осциллограмм на рис. 4.26. Он позволяет фиксировать возникновение аномалий в сигналах, например пропусков или выбросов. Как видно из рис. 4.26, таких аномалий у сигналов генератора AFG3252 нет (да и не должно быть). Однако заметное расширение линий осциллограмм свидетельствует о наличии шумовых компонент в каждом из трех сигналов. Яркие линии (в оригинале они ярко-красные) указывают на границы шумовых полосок осциллограмм.

Высокая разрешающая способность осциллограмм осциллографов TDS 7000 позволяет наблюдать мелкие погрешности формы импульсов генераторов и судить о правильности установок приборов. Например, на рис. 4.27 показаны осциллограммы двух каналов и ТТЛ-выхода генератора AFG3252 при подаче всех сигналов на высокоомные входы осциллографа (таблица выбранных сопротивлений входов показана под осциллограммами). На прямоугольных импульсах с быстрыми перепадами после них заметны выбросы и колебания. Они обусловлены неточным согласованием кабелей, соединяющих выходы генератора с входами осциллографа.

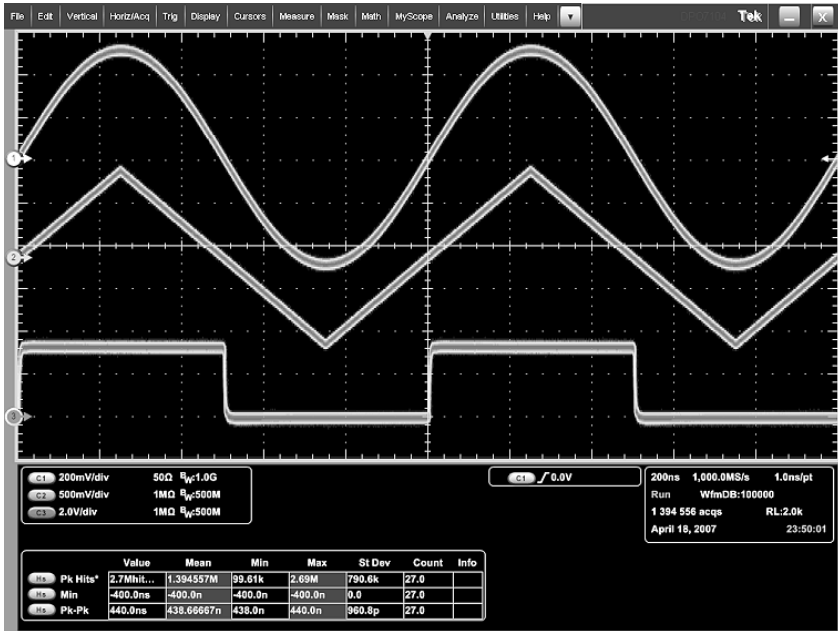


Рис. 4.26. Осциллограммы трех сигналов генератора AFG3252, снятые с экрана цифрового осциллографа TDS 7000 в режиме использования "цифрового фосфора"

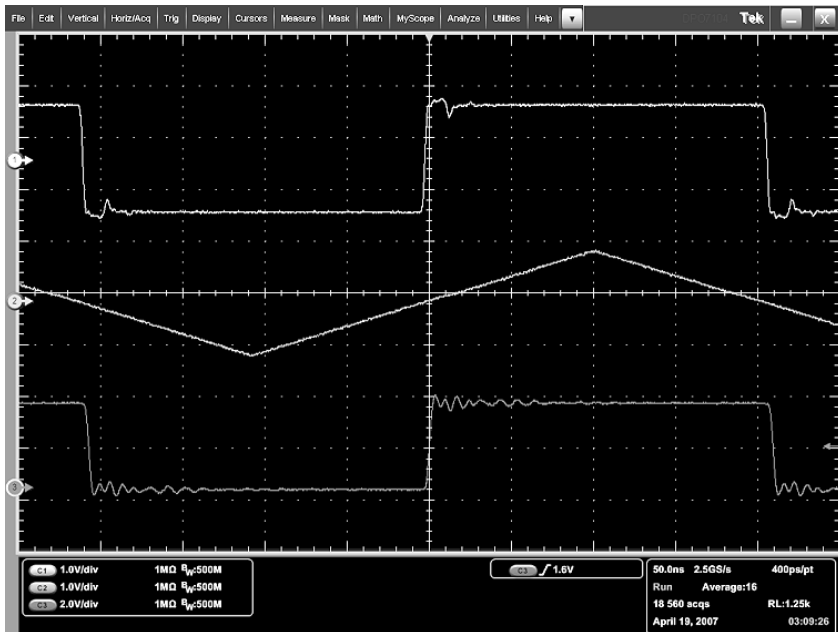


Рис. 4.27. Пример просмотра сигналов при высокоомных входах осциллографа

На рис. 4.28 показан просмотр сигналов при установке входов осциллографа в состояние с входным сопротивлением 50 Ом. Нетрудно заметить, что форма наблюдаемых импульсов существенно улучшилась — точнее говоря, она стала близкой к той, которую выдает генератор при его правильном применении. Обратите внимание на прекрасную форму треугольного сигнала, осциллограмма которого для лучшего просмотра увеличена по вертикали. ТТЛ-импульсы просматриваются на несогласованном (высокоомном) входе, и потому имеют хорошо заметные выбросы и колебания после их фронтов (перепадов).

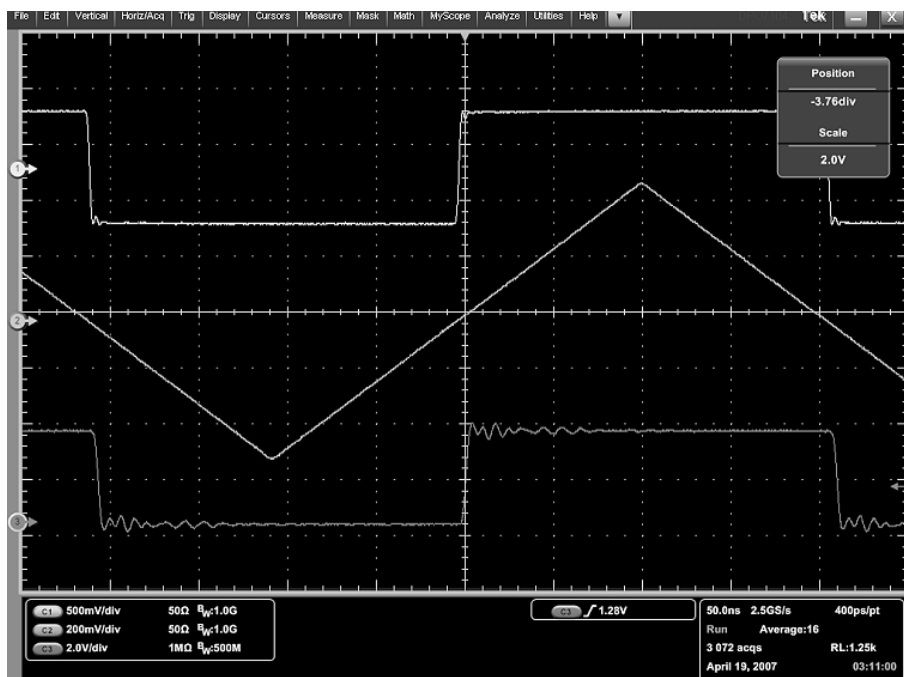


Рис. 4.28. Пример просмотра сигналов при 50-омных входах осциллографа (вход для ТТЛ-сигнала высокоомный)

Рис. 4.29 иллюстрирует получение на выходах каждого из двух каналов генератора AFG3252 пачек импульсов разной формы и разной длительности. Это полезно при испытании двухканальных устройств. Вообще, надо отметить, что у генераторов AFG3252 предусмотрены возможности синхронизации нескольких устройств и их запуска для получения многоканальных импульсных последовательностей.

Рис. 4.30 иллюстрирует еще одну интересную и полезную возможность генераторов серии AFG3000 — формирование амплитудно-модулированных сигналов прямоугольной формы. Обратите внимание на то, что вершины импульсов уже не горизонтальны, они являются вырезками синусоидального модулирующего сигнала. Фактически это значит, что сигнал теряет прямоугольность формы. Возможности генерирования АМ сигналов синусоидальной формы уже отмечались (см. рис. 4.13).

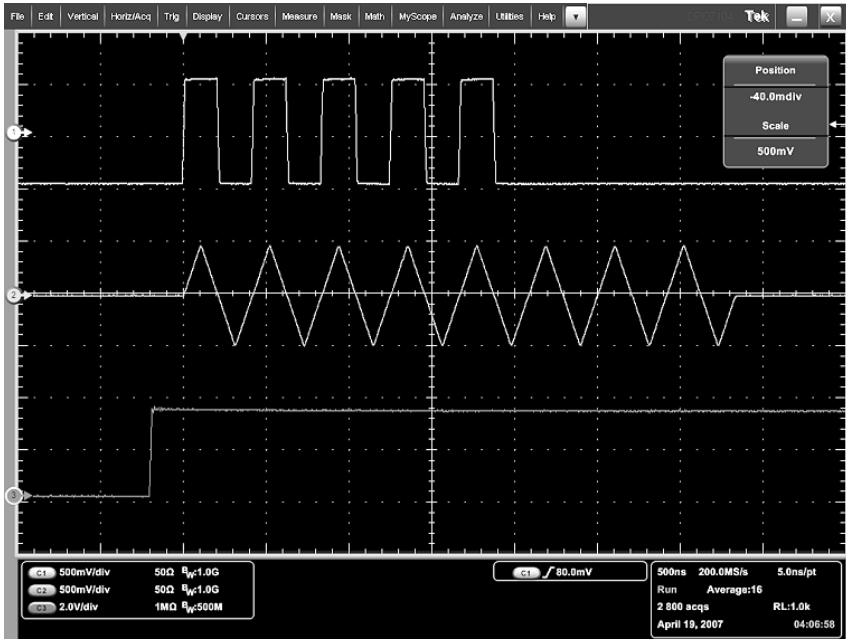


Рис. 4.29. Пример получения двух пакетов импульсов разной формы и разной длительности

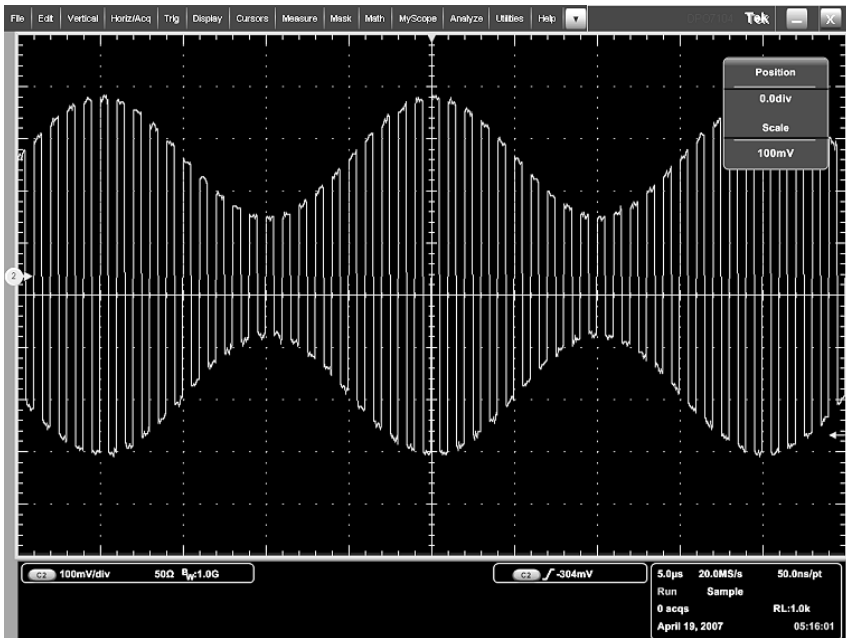


Рис. 4.30. Осциллограмма АМ сигнала прямоугольной формы

Приведем еще один пример совместной работы двух каналов, показанный на рис. 4.31. На одном канале задан выход гауссовского сигнала, а на другом — сигнала функции $\sin(x)/x$. Как и в других примерах, для очистки сигнала от шумов как генератора, так и цифрового осциллографа используется режим усреднения осциллограмм: Average=16.

Наличие у двухканальных генераторов двух выходов облегчает отладку многих устройств и позволяет организовать проверку их некоторых специфических возможностей. Например, можно проверить отображение фигур Лиссажу осциллографами, имеющими режим XY. Мы вернемся к этому в следующей главе.



Рис. 4.31. Осциллограммы сигналов двух функций: Гаусса (сверху) и $\sin(x)/x$ (снизу)

4.3. Программное обеспечение генераторов AFG3000

4.3.1. Назначение программы ArbExpress и ее интерфейс

Возможности генераторов сигналов произвольной формы Tektronix AFG3000 и других серий генераторов корпорации Tektronix существенно расширяются при использовании поставляемой с ними программы *ArbExpress*, с помощью которой возможно дистанционное управление генераторами от персонального компьютера (ПК) класса IBM PC/AT и программное задание сигналов произвольной формы [100]. Это позволяет реализовать автоматизированные измерения практически с любыми тестовыми сигналами.

Установка программы ArbExpress и другого сопутствующего программного обеспечения (в частности коммуникационной программы *Open Chose*) с CD-ROM самая обычная. Рассмотрим работу с программой ArbExpress после ее запуска. На рис. 4.32 представлено основное окно программы ArbExpress. Программа имеет обычный интерфейс: титульную строку, меню, панели инструментов и характерную панель Shortcut View. В ней сверху указаны основные режимы работы программы:

Standard Waveform... — вывод окна задания сигналов стандартной формы;

Equation Edition... — вывод окна редактора формул для аналитического задания сигналов;

Blank... — вывод окна-бланка для графического задания сигналов;

Properties... — вывод окна свойств сигналов.

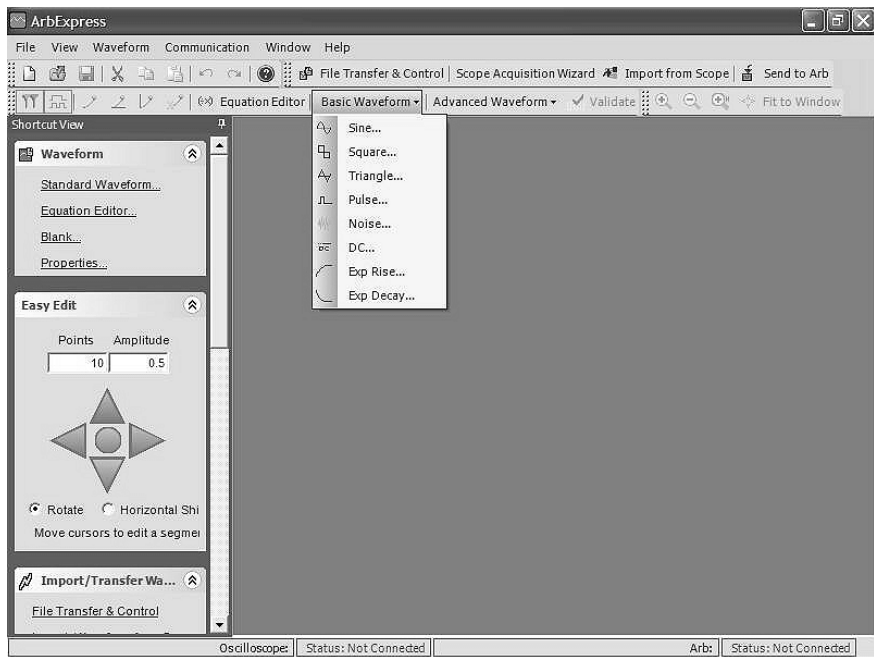


Рис. 4.32. Окно программы ArbExpress

4.3.2. Создание сигналов стандартных форм

Изначально большая часть окна программы пуста. Позиции меню и некоторые инструменты в инструментальной панели имеют выпадающие списки. Один из таких списков Basic Waveform показан в открытом состоянии. Он позволяет вывести окно с одной из стандартных форм сигналов. Если выбрать одну из позиций списка, напри-

мер, Triangle... (треугольный сигнал), то появится окно установки вида и параметров сигналов стандартной формы (рис. 4.33).

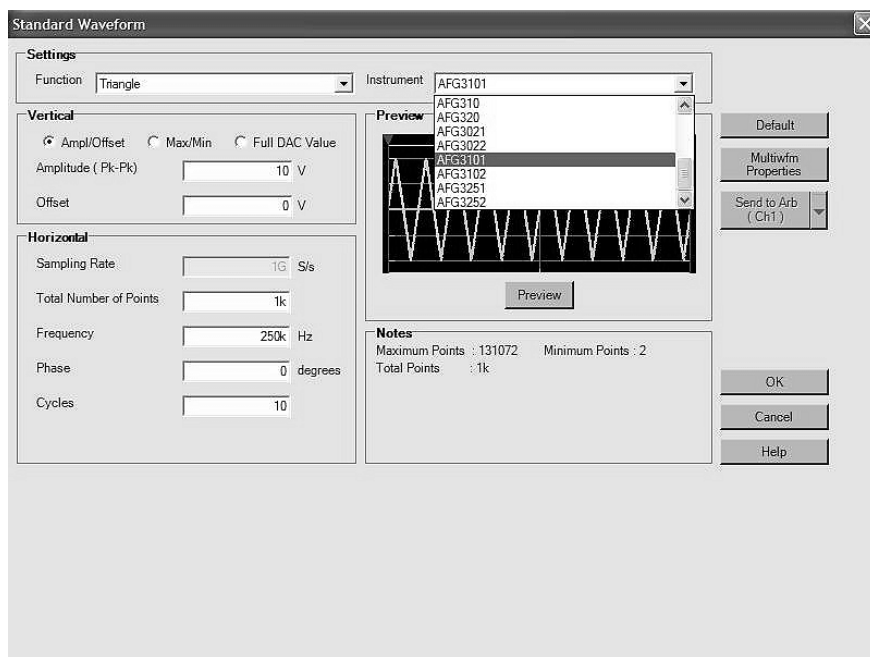


Рис. 4.33. Окно установки вида и параметров сигналов стандартной формы

В этом окне имеется ряд зон. В зоне Setting (Установка) имеется два списка: Function — установка функциональной зависимости сигнала и Instrument — для выбора генератора, с которым используется программа. Последний список представлен в открытом виде, и из него видно, что программа поддерживает работу не только с приборами серии AFG3000, но и с рядом других приборов. Выбор позиций этих списков очевиден. Зоны Vertical и Horizontal служат для установки также достаточно очевидных амплитудных и временных параметров сигналов. Это окно является контекстно-зависимым, и набор параметров в нем в общем случае различен для различных выбранных форм сигналов.

Одним из важнейших параметров является скорость дискретизации Sampling Rate (измеряется числом отсчетов в секунду — S/s). Она должна иметь значения, допустимые для используемой модели генератора. Если какой-то параметр сигнала задан неверно, в конце его строки появляется красный мигающий восклицательный знак в кружочке. Окно Preview при активизации мышью кнопки обеспечивает построение и обзор формы сигнала. В правой части окна имеется шесть кнопок со следующим назначением:

Default — установка параметров по умолчанию;

Multiwfm Properties — установка свойств файлов .wfm (с генераторами AFG не используется);

Send to Arb — пересылка заданного сигнала на генератор (с выбором из списка канала CH1 или CH2);

Ok — завершение установок и закрытие окна;

Cancel — закрытие окна без внесенных изменений;

Help — вывод справки.

Если нажать кнопку **Ok**, то окно Standard Waveform закроется, и в основном окне появится окно с осциллограммой заданного сигнала (или с двумя осциллограммами в случае работы с двухканальным генератором серии AFG3000). В начале и в конце окна с осциллограммой (рис. 4.34) имеются два курсора (1 и 2), которые можно перемещать мышью, выделяя часть осциллограммы.

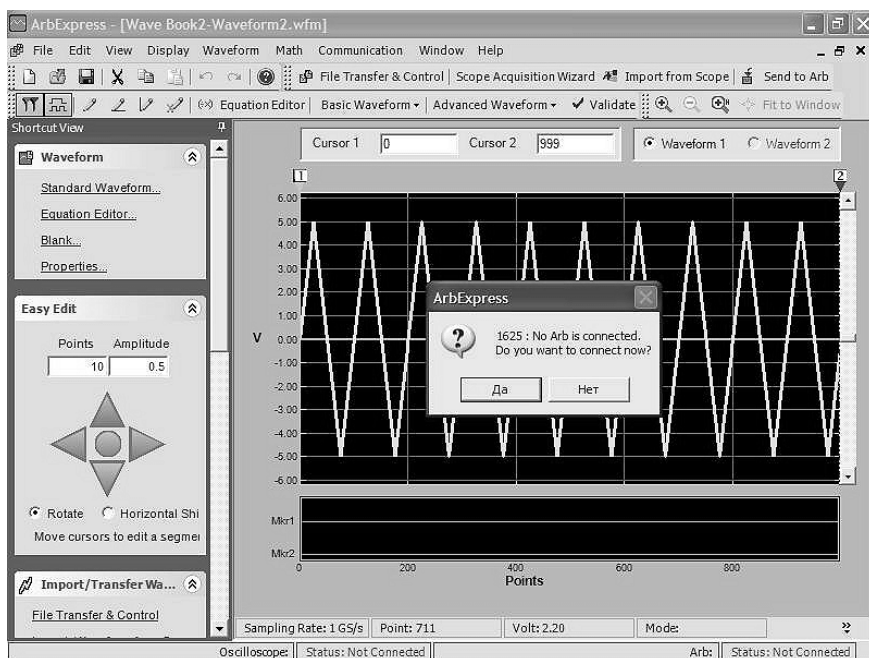


Рис. 4.34. Окна программы ArbExpress с окном заданной осциллограммы

4.3.3. Настройка на типы приборов и работа с файлами

В нижней строке статуса отображаются данные о цифровом осциллографе и генераторе, с которыми может работать команда. Красная надпись "Status: Not Connected" означает, что пока связь с этими устройствами отсутствует. Программа позволяет преобразовать осциллограмму цифрового осциллографа в сигнал, который будет генерироваться генератором сигналов. Для отправки данных созданного сигнала в окнах

программы имеется кнопка **Send to Arb**. Если генератор не подключен, то ее активизация вызывает появление информационного окна, показанного в центре осциллограммы сигнала (см. рис. 4.34) с запросом о подключении генератора. Ответив на него "ДА", можно обеспечить подключение генератора — при условии, разумеется, что он включен и физически подключен к компьютеру. При этом появится окно перемещения и контроля файлов AWG/AFG File Transfer and Control, показанное на рис. 4.35.

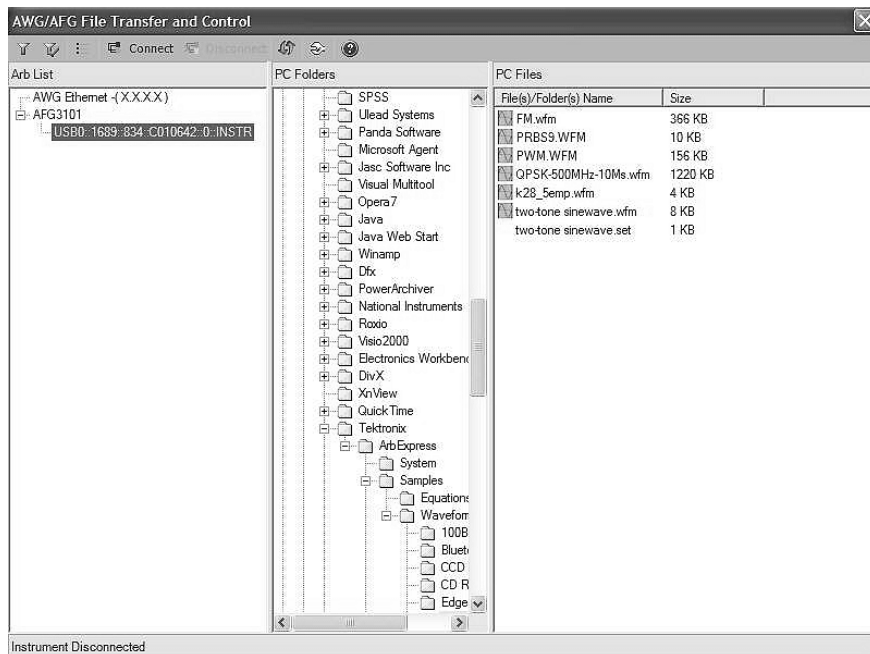


Рис. 4.35. Окно перемещения и контроля файлов до подключения генератора AFG3000

В разделе Arb List имеется дерево подключенных приборов. В нем должен быть представлен генератор серии AFG3000 — в окне на рис. 4.35 ветвь генератора выделена. Для подключения генератора достаточно нажать кнопку **Connect** на панели инструментов. Будет осуществлено подключение генератора к программе, а окно на рис. 4.35 превратится в окно, показанное на рис. 4.36.

В окне на рис. 4.36 появились две важные зоны. Одна из зон Transfer Direction указывает на направления перемещения файлов из компьютера PC в систему памяти генератора. Последняя содержит редактируемую область внутренней памяти EMEM, 4 файла пользователя USER1-4 и внешнюю память на флэш-карте памяти, которая вставляется в разъем на передней панели генератора USB Memory. Перенос файлов в том или ином направлении (из памяти генератора в ПК или наоборот) осуществляется перетаскиванием мышью.

Вторая зона — Instrument Control содержит достаточно очевидные установки генератора: селектор канала, функцию генерируемого сигнала, амплитудные параметры сигнала и его смещение, режим работы (по умолчанию непрерывный), частоту сигнала

ла и число точек сигнала. Кнопка **Apply** позволяет применить текущие установки, а кнопка **Cancel** закрывает окно — при этом происходит возврат в основное окно.

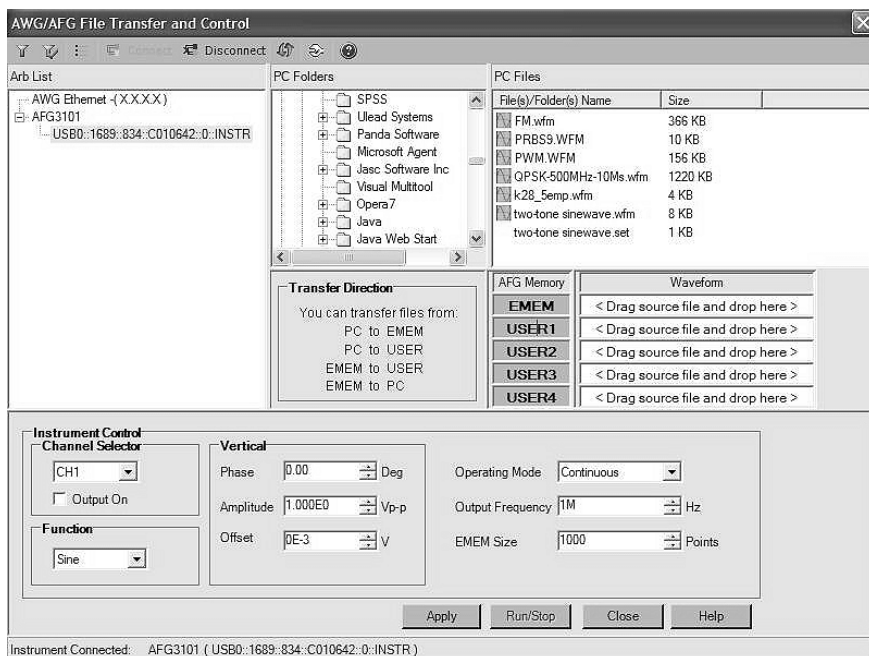


Рис. 4.36. Окно преобразования и контроля файлов после подключения генератора AFG3000

Команда **Send Waveform to Arb** в позиции меню **Communication** и на панели инструментов окон обеспечивает передачу установок выбранного сигнала (из текущего окна) в генератор AFG3000. Это начинается с вывода окна (рис. 4.37) с предупреждением о замене файла в текущей области файлов генератора. Если ответить утвердительно, то начнется перенос файлов. Он продолжается несколько секунд и сопровождается выводом окна с линейным индикатором.

4.3.4. Программирование формы сигналов

Программа ArbExpress может работать как совместно с генератором серии AFG3000, так и автономно, например, для подготовки файлов с сигналами нужной формы, которые в дальнейшем будут использованы для загрузки в генератор. Наряду с созданием сигналов стандартных форм программа ArbExpress обеспечивает создание сигналов, временная зависимость которых задается математическим выражением. Для этого служит редактор математических формул, окно которого (рис. 4.38) вызывается активизацией гиперссылки **Equation Editor**....



Рис. 4.37. Окно с предупреждением о замене файла в текущей области файлов генератора

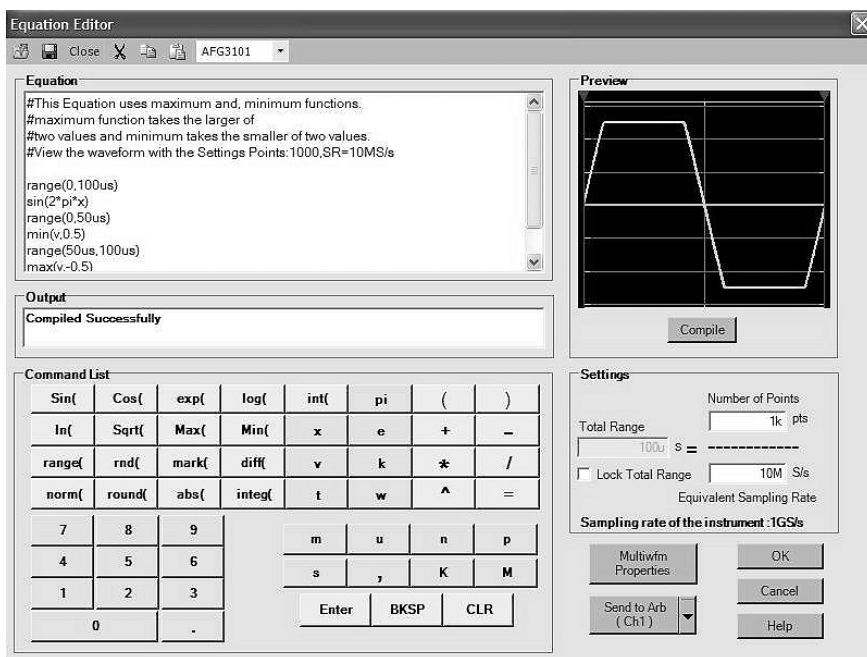


Рис. 4.38. Окна редактора формул программы ArbExpress

В окне редактора Equation можно составить простую программу, используя символы и функции, вводимые кнопками в окне Command List. Основные математические функции и операторы, которые можно использовать для записи программ в окне Equation:

Sin(— синус выражения;

Cos(— косинус выражения;

exp(— вычисление экспоненты выражения;

log(— вычисление десятичного логарифма выражения;

int(— вычисление целой части значения выражения;

pi — вычисление числа "пи";

In(— вычисление натурального логарифма выражения;
Sqrt(— вычисление квадратного корня из выражения;
Max(— вычисление максимального из значений;
Min(— вычисление минимального из значений;
range(— задает пределы изменения аргумента для последующих выражений;
rnd(— возвращает случайное число с заданной базой;
diff(— вычисляет значения производной выражения;
norm(— нормализует выражение, приводя его размах к 1;
round(— округляет значение выражения;
abs(— вычисляет абсолютное значение выражения;
integ(— вычисляет значения интеграла выражения.

Помимо указанных кнопок задания функций в зоне Command List имеются кнопки для ввода имен переменных, скобок и арифметических операторов. При использовании функции необходимо ввести аргумент (или аргументы) и закрывающую круглую скобку. Все это и позволяет задавать сигналы в аналитическом виде с помощью простого языка программирования. Программа вводится в окне Equation, причем в одной строке допустимо применение одного математического или программного выражения. Компиляция программы и вывод графика заданной временной зависимости сигнала осуществляются кнопкой **Compile**. Компиляция проходит успешно только при правильном выборе параметров дискретизации сигнала. В противном случае выводится сообщение об ошибке и график временной зависимости сигнала не строится.

Нетрудно заметить, что среди операторов и функций нет широко распространенных конструкций условного оператора-функции **if** и циклов. Однако оператор **range** позволяет задавать интервалы времени как глобальные, так и частичные. Кроме того, операторы выбора минимума **Min**(и максимума **Max**(позволяют просто осуществить выбор сигналов как с постоянными значениями, так и меняющимися. Поясним их применение на ряде примеров.

Следующий пример программы с подробным комментарием обеспечивает задание синусоиды, ограниченной сверху и снизу:

<i>Текст программы</i>	<i>Комментарий</i>
range(0,100us)	Задается общий отрезок времени от 0 до 100 мкс
sin(2*pi*x)	Задается вычисление функции $\sin(2\pi x)$ с периодом 100 мкс
range(0,50us)	Задается частный отрезок времени от 0 до 50 мкс
min(v,0.5)	Формируется положительный полупериод обрезанной синусоиды
range(50us,100us)	Задается частный отрезок времени от 50 до 100 мкс
max(v,-0.5)	Формируется отрицательный полупериод обрезанной синусоиды

Эта же программа с вступительным комментарием (задается после знаков #) представлена в окне Equation на рис. 4.38. Подготовленная программа (если она верна) компилируется без ошибок, и в окне предварительного просмотра Preview можно наблюдать график созданной зависимости. Кнопка **Send to Arb** позволяет направить созданный сигнал в указанный канал генератора. Эта операция уже была описана выше. Тот же результат с уровнями ограничения 0,8 и -0,8 дает следующая, более простая, программа:

```
range(0,100us)
min(sin(2*pi*x),0.8)
range(50us,100us)
max(-sin(pi*x),-0.8)
```

Далее рассмотрим программу, которая формирует пять столбцов с нарастающей линейно амплитудой (рис. 4.39):

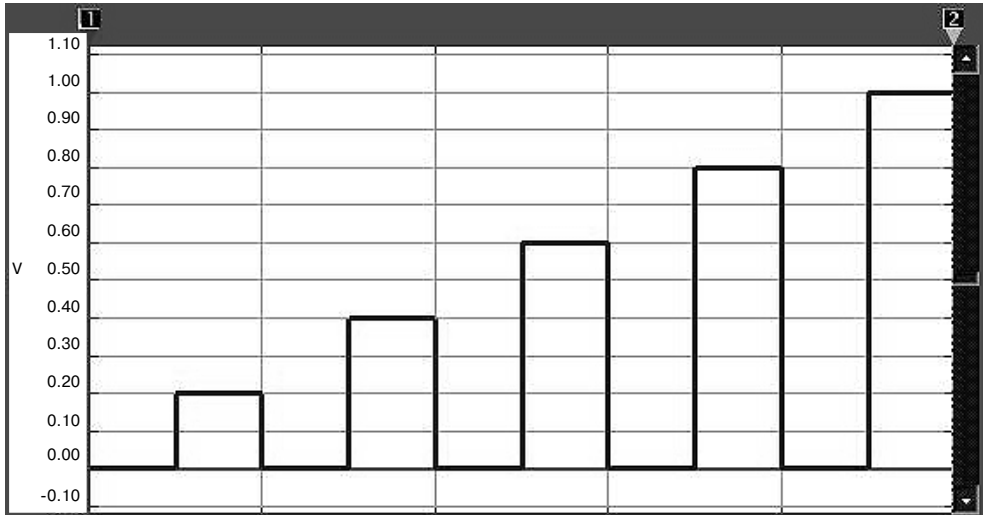


Рис. 4.39. Сигнал в виде пяти столбцов с нарастающей амплитудой

```
range(10us,20us)
max(v,0.2)
range(30us,40us)
max(v,0.4)
range(50us,60us)
max(v,0.6)
range(70us,80us)
max(v,0.8)
```

```
range(90us,100us)  
max(v,1.0)
```

Другая программа задает построение лестничного импульса, содержащего пять ступенек (рис. 4.40):

```
range(10us,20us)  
max(v,0.2)  
range(20us,30us)  
max(v,0.4)  
range(30us,40us)  
max(v,0.6)  
range(40us,50us)  
max(v,0.8)  
range(50us,60us)  
max(v,1.0)
```



Рис. 4.40. Лестничный сигнал с пятью ступеньками

Следующий, более сложный сигнал (последовательно задается период синусоиды, период меандра, период треугольного импульса и участок шума (см. рис. 4.41)), задает следующая программа:

```
range(0us,20us)  
sin(2*pi*x)  
range(20us,30us)  
max(1,1)
```

```

range(30us,40us)
min(0,-1)
range(40us,50us)
x
range(50us,70us)
1-x*2
range(70us,80us)
-1+x
range(80us,100us)
rnd(100)
    
```

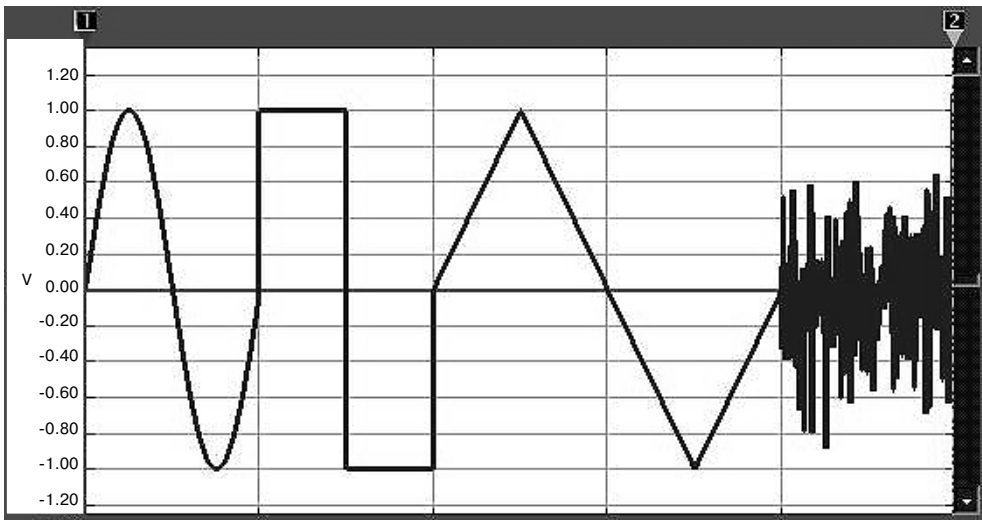


Рис. 4.41. Сложный сигнал в виде отрезков (по одному периоду) синусоиды, меандра, треугольного импульса и шума

4.3.5. Применение графического редактора формы сигналов

Приведенные выше примеры наглядно демонстрируют технику программирования сигналов самой разнообразной формы, задаваемой математическими зависимостями на различных участках времени. Но есть еще и возможность генерации любых нарисованных зависимостей. Для этого служит *графический редактор формы сигналов*. В нем можно вызвать пустой бланк временной зависимости и с помощью электронного карандаша с различными функциями нарисовать от руки произвольную временную зависимость сигнала (рис. 4.42).

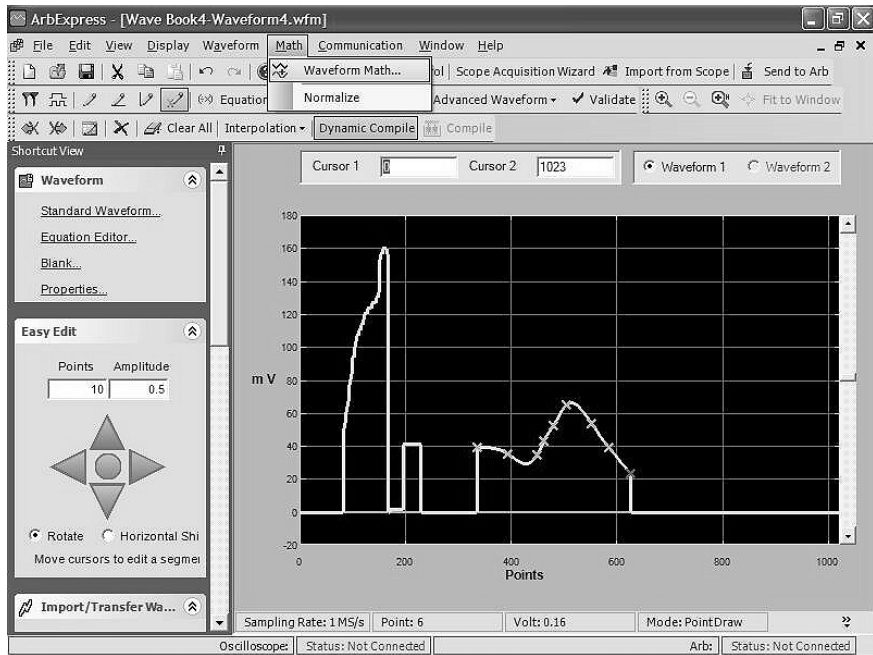


Рис. 4.42. Пример создания сигнала произвольной формы с помощью графического редактора программы ArbExpress (использованы карандаши разного типа)

При рисовании формы сигнала применяется простой графический редактор. Он позволяет представлять форму сигналов по точкам и осуществлять протяжку линий карандашом произвольным образом, по вертикали или горизонтали, а также линейную или сплайновую интерполяцию формы сигналов в промежутке между точками. Соответствующие типы карандашей можно найти на панели инструментов и в позиции **Edit** меню.

4.3.6. Математические операции с сигналами

В позиции **Math** меню (на рис. 4.42 она открыта) есть команды *математических операций* и нормализации кривых. Команда **Waveform Math ...** позволяет выполнять ряд математических операций с заданной формой сигнала и вспомогательной зависимостью. Это делается в открывающемся окне математических операций (рис. 4.43). Окно справа содержит три окна с графиками сигналов — основным, вспомогательным и результирующим. В левой части представлена зона **Math Source** выбора вспомогательного сигнала (из библиотеки или в виде скалярного сигнала), операций (сложения, вычитания, умножения и деления), окно задания опции работы только с областями сигнала, выделенными курсорами и, наконец, кнопки завершения работы **OK**, выхода

Cancel и справки **Help**. При нажатии кнопки **OK** обработанный сигнал переносится в основное окно программы.

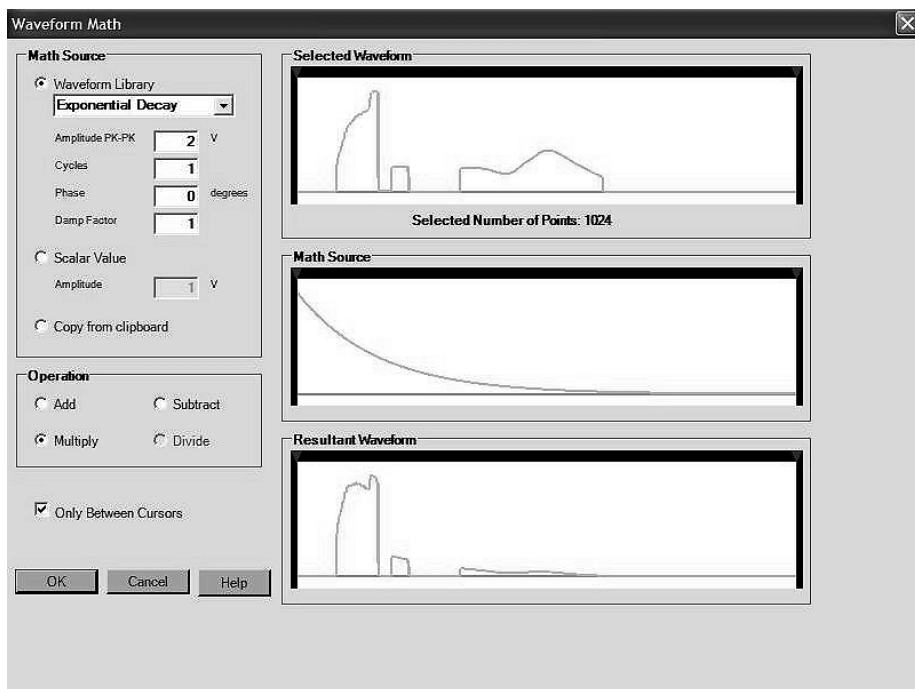


Рис. 4.43. Пример математической обработки сигнала, представленного на рис. 4.42

4.3.7. Построение сигнала по осциллограмме

Даже при наличии средств создания произвольных сигналов (как аппаратных, так и программных) создание сигналов близких к реальным (например, содержащих шумы, наводки, различные аномалии и т. д.) остается сложной и трудоемкой задачей. Следует отметить, что при наличии цифровых осциллографов фирмы Tektronix есть возможность использовать его осциллограммы в качестве *шаблона* для задания формы сигнала, редактируемого и загружаемого в память генераторов серии AFG3000 [101] и генераторов ряда других серий.

Ниже описывается, как это делается при совместном применении этих приборов и с использованием программы ArbExpress, поставляемой с генераторами AFG3000 на примере их стыковки с осциллографом серии TDS 2024B (это современный 4-канальный 200 МГц осциллограф с USB-портом для подключения ПК). Комплекс из этих двух приборов умеренной стоимости позволяет решать огромное число научно-технических и образовательных задач в области генерации, осциллографирования, модели-

рования и обработки сигналов. При этом приборы прекрасно согласуются друг с другом по конструктивному оформлению и размерам, по техническим характеристикам и простому и удобному интерфейсу пользователя.

Для реализации этой возможности необходимо, прежде всего, установить нужное программное обеспечение — коммуникационные программы и программу ArbExpress. Рекомендуется вначале установить программное обеспечение применяемого осциллографа, а затем генератора. До этого приборы не нужно подключать к персональному компьютеру (ПК), поскольку он может не распознать их или распознать неверно. Затем стоит проверить работоспособность приборов с помощью программ Open Choice Desktop, NI SignalExpress Tektronix Edition (описана в конце этой главы) или ArbExpress. Только после этого можно приступить к осуществлению совместной работы генераторов и осциллографов с помощью программы ArbExpress.

Поскольку работа программы ArbExpress с генератором серии AFG3000 уже описывалась выше, начнем рассмотрение ее иных возможностей при совместной работе с осциллографом TDS 2024B. Обратите внимание на надписи в строке статуса. Надпись "Arb AFG3101: Status Connected" говорит о том, что генератор AFG3101 подключен к ПК, включен и между ним и ПК установлено соединение. А надпись "Oscilloscopes: Status No Connected" указывает на то, что связи между ПК и осциллографом пока нет (даже если он подключен к ПК через порт USB и включен).

Теперь необходимо проверить включение осциллографа и подать на него сигнал, который предполагается загрузить в память генератора произвольных функций. В качестве примера далее использован сигнал пилообразной формы, полученный от функционального генератора MXG-9810A.

Для установления *связи с ПК* включенного осциллографа нужно активизировать кнопку **Scope Acquisition Wizard**. Появится окно, показанное на рис. 4.44. В левой части окна находится список шагов, которые необходимо выполнить для передачи нужной осциллограммы в окно просмотра осциллограмм программы. Окно, показанное на рис. 4.44, соответствует первому шагу с именем **Welcom** (приглашение к началу работы).

Активизировав кнопку **Next**, перейдем к следующему шагу — выбора инструмента (Select Instrument). Окно контроля этого шага показано на рис. 4.45. Если все нормально с работой осциллографа, то в списке инструментов появится тип осциллографа, название шины, по которой он подключен к ПК и VISA-описатель прибора. Под списком размещены данные об осциллографе (размер памяти осциллограмм, число каналов и, возможно, полоса частот). В нашем случае будут представлены данные применяемого прибора TDS2024B.

Если что-то с включением осциллографа неблагополучно, данные прибора будут отсутствовать. В этом случае надо проверить включение осциллографа и с помощью кнопки **Refresh** обновить селекцию прибора. Если и в этом случае данный шаг не выполняется, то это означает некорректную установку программного обеспечения осциллографа и его следует переустановить. Иногда полезно отключить прибор от ПК и снова его включить.



Рис. 4.44. Окно шага *Welcome*

Когда указанная информация в окне есть, то надо активизацией кнопки **Next** перейти к следующему шагу **Set Up Acquisition**. Просмотрев содержание этого простого окна и выбрав (или согласившись) с представленными установками, можно перейти к следующему шагу — предварительному просмотру осциллограммы выбранного канала — **Preview Waveform**. Его окно показано на рис. 4.46 и подтверждает прием осциллограммы с осциллографа.

Выполнив аналогичным образом оставшиеся шаги, можно наблюдать появление осциллограммы уже в окне просмотра осциллограмм программы ArbExpress (рис. 4.47). Заметим, что это означает возможность хранения осциллограмм от осциллографов средствами программы ArbExpress.

Активизировав кнопку со списком **Send to Arb**, можно передать видимую осциллограмму в генератор AFG3000 и наблюдать ее появление на экране генератора. Передача данных на генератор сопровождается появлением окна линейным индикатором загрузки, которое видно в левом верхнем углу окна программы ArbExpress.

Теперь можно использовать заданный сигнал как сигнал произвольной функции. Его можно сохранить в виде файла, можно подготовить библиотеку тестовых сигналов и записать ее на карту флэш-памяти, которую можно устанавливать в генератор AFG3000 и использовать его и без компьютера. Наш пример относился к одноканальному генератору произвольных сигналов, но в случае двухканальных генераторов можно аналогичным путем задать два независимых сигнала.

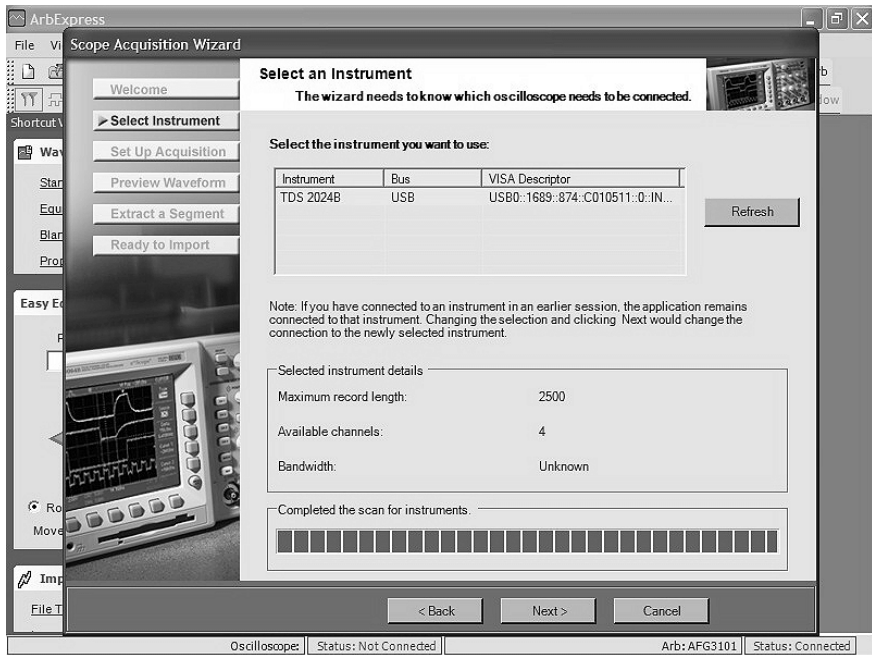


Рис. 4.45. Окно шага Select Instrument

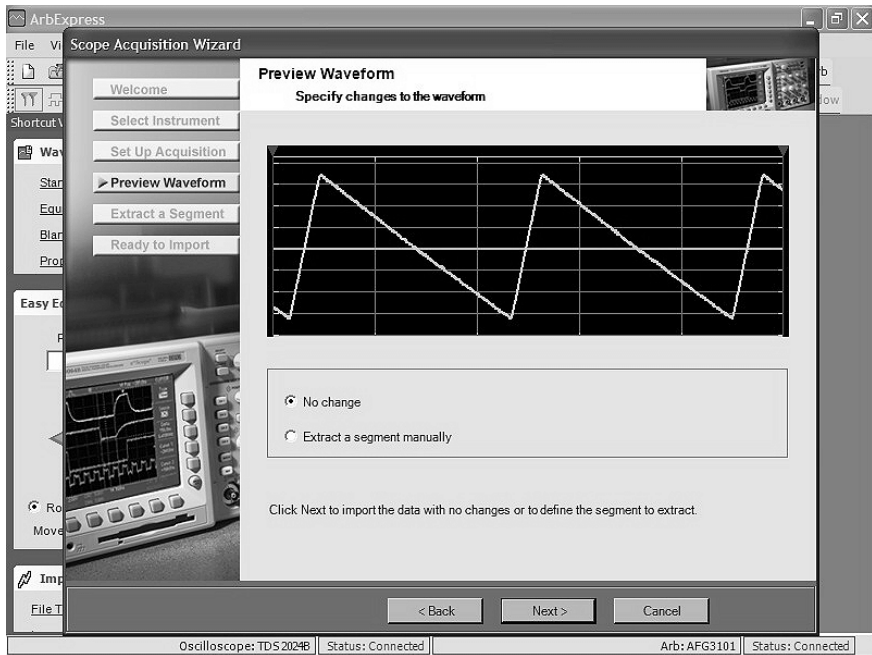


Рис. 4.46. Окно шага предварительного просмотра Preview Waveform

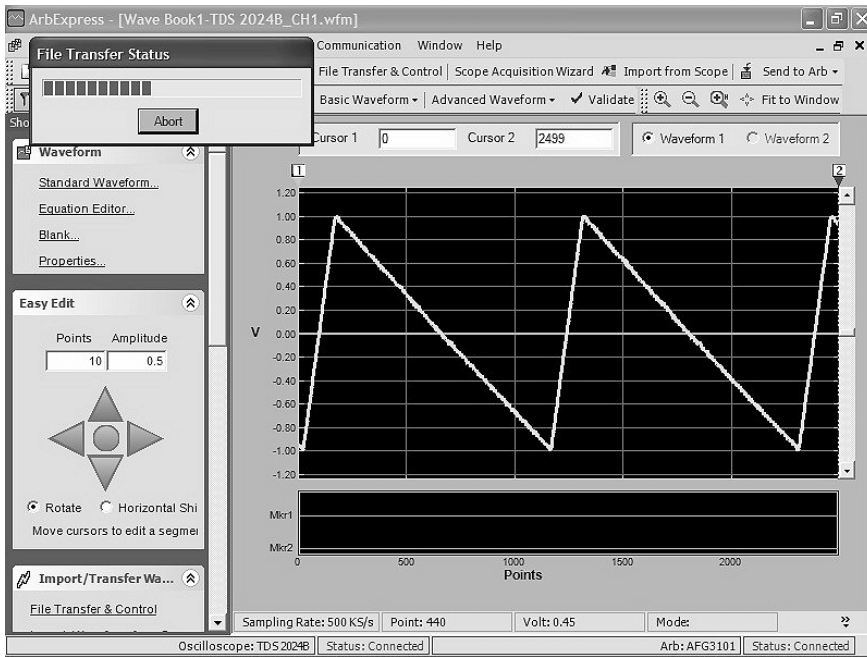


Рис. 4.47. Окно программы ArbExpress с полученной от осциллографа осциллограммой

4.4. Работа измерительных приборов с системой MATLAB

4.4.1. Назначение матричной системы MATLAB

Выше были рассмотрены программные средства, специально ориентированные на организацию связи с ПК и обеспечивающие передачу в ПК изображений осциллограмм и данных (кодов). Однако особенно большие возможности в обработке сигналов дают современные версии *систем компьютерной математики (СКМ)* [104], математические и графические средства которых чрезвычайно разнообразны и обширны. К таким СКМ относятся Mathcad [105], MATLAB [106-107] и др.

К сожалению, поддержка формата файлов .CSV, используемого в осциллографах TDS 1000B/2000B, файлов сигналов генераторов AFG3000 и других этими системами прямо не обеспечивается. Кроме того, желательна непосредственная работа с осциллографами СКМ, без идентификации и активизации осциллографов указанными выше программами и без промежуточного преобразования данных в файлы. Все это обеспечивает пакет расширения Instrument Control Toolbox системы MATLAB, введенный в ее последние версии. При этом обеспечивается поддержка виртуальных инструментов стандартной архитектуры VISA (Virtual Instrument Standard Architecture).

4.4.2. Подготовка к стыковке осциллографов с системой MATLAB

К сожалению, примеры применения в справке этого пакета (в его описании) даны применительно к более старым моделям осциллографов, подключаемым к ПК через медленные порты — коммутационный RS-232 (COM) и приборный GPIB. Поддержка соединения через USB-порт хотя и обеспечена *накетом Instrument Control Toolbox*, но описана очень кратко и без реальных примеров применения. Это не удивительно, поскольку пакет Instrument Control Toolbox был создан до появления массовых осциллографов с USB-интерфейсом, в частности TDS1000B/2000B. Этот серьезный пробел восполнила статья [103], материал которой положен в основу приведенного ниже описания.

Сразу же отметим, что предполагается, что осциллограф серии TDS1000B/2000B подключен кабелем к порту USB и на ПК установлена СКМ MATLAB с пакетом расширения Instrument Control Toolbox. Практически использовалась версия СКМ MATLAB R2006b. Должна быть установлена и программа VISATek.

Пакет расширения Instrument Control Toolbox предоставляет для разработки программ стыковки осциллографа с системой MATLAB следующие основные функции:

- `instrhwinfo` — информация о подключенном к ПК устройстве;
- `visa` — конструирование VISA-объекта;
- `fopen` — подключение VISA-объекта к прибору;
- `query` — запись или чтение форматированных данных с прибора;
- `fprintf` — запись текста в прибор;
- `fclose` — отключает связь с прибором;
- `binblockread` — поблочное чтение данных с прибора.

Для детального знакомства с каждой из этих функций достаточно в командном окне MATLAB выполнить команду

```
>> instrhelp name
```

Здесь name — имя функции.

Перед проектированием программ необходимо убедиться в том, что на ПК установлена программа TekVISA. Для этого следует воспользоваться следующей командой:

```
>> tekvisainfo=instrhwinfo('visa','tek')
tekvisainfo =
    AdaptorDllName: [1x67 char]
    AdaptorDllVersion: 'Version 2.4.1'
    AdaptorName: 'TEK'
    AvailableChassis: []
    AvailableSerialPorts: {'ASRL1'}
    InstalledBoardIds: []
    ObjectConstructorName: {'visa('tek', 'ASRL1::INSTR');'}
```

```
SerialPorts: {'ASRL1'}  
VendorDllName: 'visa32.dll'  
VendorDriverDescription: 'Tektronix VISA Driver'  
VendorDriverVersion: 3
```

Эта информация указывает на то, что изначально предполагается работа прибора с COM-портом ASRL1. Чтобы работать с портом USB, надо создать программу на языке системы MATLAB, определив при этом описание осциллографа. Для этого можно воспользоваться поставляемой с прибором программой OpenChoice. На рис. 4.48 показан момент регистрации осциллографа TDS-2024B в окне этой программы. Для получения списка объектов надо активизировать кнопку Refresh. В данном случае осциллограф является одним из трех подключенных к ПК USB-объектов. Выделив нужный объект, его можно идентифицировать, активизируя кнопку Identify. Имя объекта появится под списком объектов. Завершается идентификация активизацией кнопки OK.



Рис. 4.48. Начало регистрации подключенных к ПК приборов

Далее следует выяснить имя VISA-устройства, которым является применяемый осциллограф. Для этого надо открыть окно Preferences программы OpenChoice Desktop и активизировать (мышью) кнопку VISA. Появится окно OpenChoice Instrument Manager со списком доступных для регистрации приборов. Выделив осциллограф, необходимо нажать кнопку Свойства. Это приведет к появлению окна TDS2024B с данными о приборе (рис. 4.49). В нем указано имя VISA-устройства и обычное имя прибора.

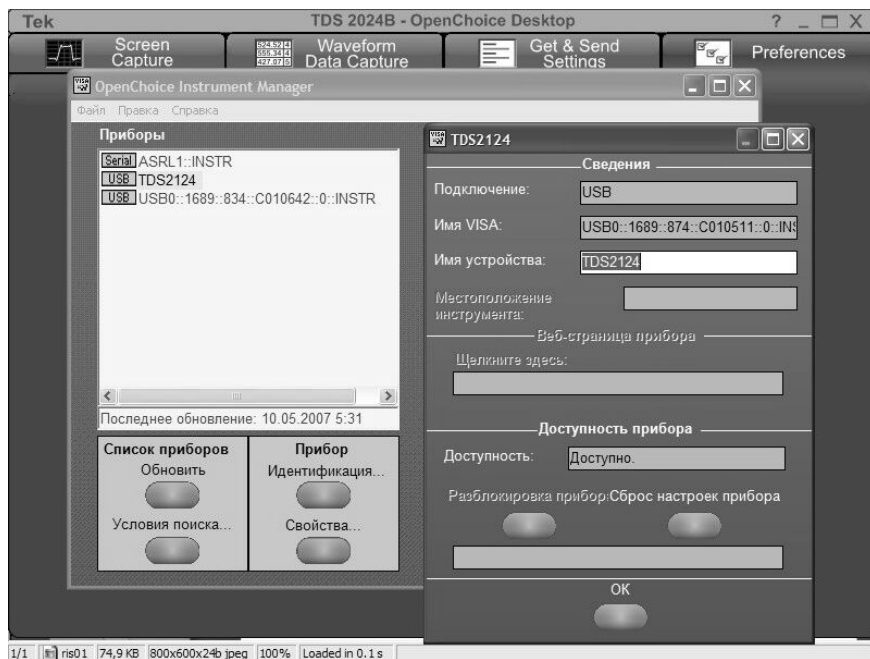


Рис. 4.49. Определение имени VISA-устройства для осциллографа TDS2024B

4.4.3. MATLAB-программы для работы с цифровыми осциллографами

На этом потребность в программе OpenChoice завершается, и ее можно закрыть и в дальнейшем использовать только тогда, когда нужны именно ее возможности — например, для получения на экране дисплея ПК точной копии экрана осциллографа. Все нужное для активизации осциллографа берет на себя программа, созданная в среде MATLAB. Она должна начинаться с создания объекта типа USB-VISA, выполнив команду:

```
>> vu = visa('tek', 'USB0::1689::874::C010511::INSTR');
```

В ней первый параметр в прямых апострофах указывает на тип объекта — осциллограф фирмы Tektronix, а второй параметр — имя VISA-устройства, определение которого было описано выше. Это имя содержит указание на порт USB, идентификационные номера устройства и его серийный номер. Важно обеспечить полную точность указания этих данных. Выполнение команды должно пройти гладко и закончиться приглашением MATLAB к дальнейшей работе в виде знака ">>". При этом происходит активизация VISA-объекта осциллографа. Исполнив команду `vu`, можно получить данные о созданном объекте.

Для детального знакомства с объектом `vu` можно использовать команды вызова окон инспектора объекта и обзора методов, используемых в этом программном объекте:


```
>> inspect(vu);
>> methodsview(vu);
```

Эти окна показаны на фоне окна сессии MATLAB на рис. 4.50. В них содержится детальная информация о созданном VISA-объекте — в нашем случае осциллографе TDS2124B.

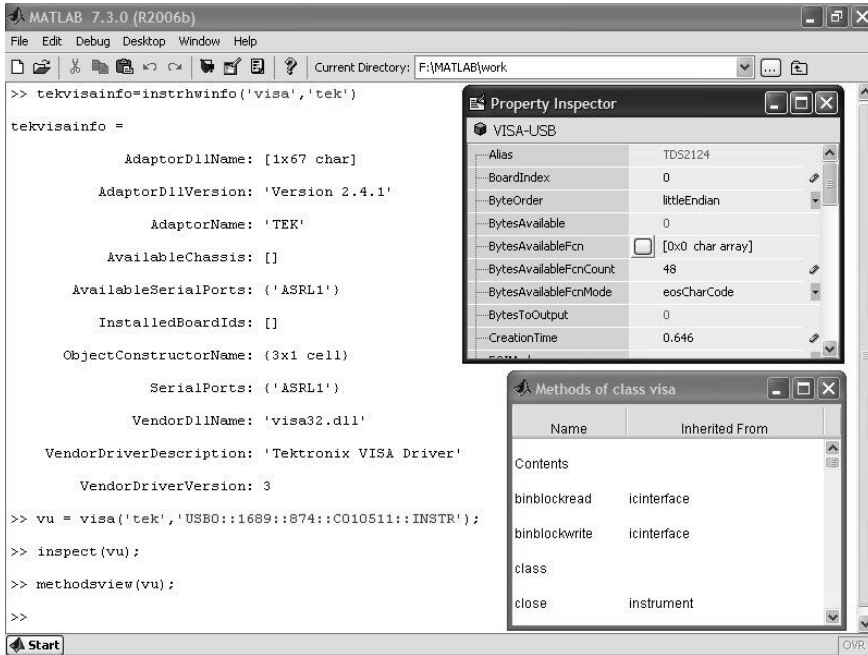


Рис. 4.50. Информация о VISA-объекте (осциллографе) в окнах системы MATLAB

Теперь создадим программу (М-файл) на языке системы MATLAB, которая обеспечивает активизацию осциллографа и передачу данных с памяти канала CH1 осциллографа в рабочую область (память) системы MATLAB с построением осциллограммы (см. рис. 4.51) в графическом окне системы MATLAB.

Для создания программы используется редактор М-файлов системы MATLAB. По завершении ввода программы надо записать файл с заданным именем, например osc.m. Эта программа представлена ниже и использует команды и функции пакета расширения Instrument Control Toolbox:

```
%Программа обеспечивает передачу данных с осциллографов
%в рабочее пространство (память)системы MATLAB, создание
%массивов xdata и ydata данных осциллограммы канала CH1
%i определение параметров, нужных для построения графика
%осциллограммы в графическом окне системы MATLAB.
%Создание VISA-объекта
```

```

vu = visa('tek','USB0::1689::874::C010511::INSTR');
fopen(vu); %Открытие объекта vu
%Считывание данных с канала CH1 и определение длины записи
id=query(vu,'*IDN?');
fprintf(vu,'DATA:SOURCE CH1');
L=query(vu,'HORIZONTAL:RECORDLENGTH?','%s\n','%d');
fclose(vu); %Закрытие объекта
vu.InputBufferSize = L; %Задание длины входного буфера
fopen(vu) %Открытие объекта vu
%Считывание данных построения осциллограмм
fprintf(vu,'CURVE?')
data=binblockread(vu,'schar');
ymult = str2num(query(vu,'WFMP:YMULT?')); %Масштаб CH1
yoff = str2num(query(vu,'WFMP:YOFF?')); %Сдвиг CH1
xmult = str2num(query(vu,'WFMP:XINCR?')); %Масштаб по оси X
xoff = str2num(query(vu,'WFMP:PT_OFF?')); %Сдвиг по оси X
xzero = str2num(query(vu,'WFMP:XZERO?')); %Нуль на оси X
%Реконструкция данных для построения графики %осциллограммы
ydata = ymult*(data - yoff); %Координаты точек по оси Y
xdata = xmult*((0:length(data)-1)-xoff)+xzero; %то же по оси X
%Построение осциллограммы в графическом окне MATLAB
plot(xdata,ydata)
title('Scaled Waveform Data'); ylabel('Amplitude (V)');
xlabel('Time (s)')
fclose(vu) %Закрытие объекта vu
Fs = 1/xmult; %Вычисление частоты отсчетов
NFFT = 1024; %Задание числа гармоник FFT

```

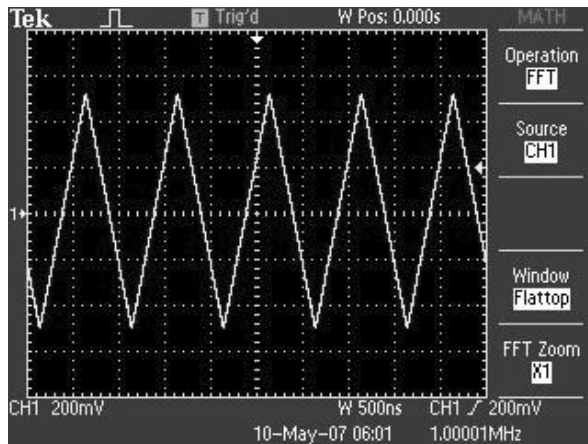


Рис. 4.51. Реальная осциллограмма треугольного сигнала

При выполнении данной программы (командой `osc` в окне командного режима MATLAB) осциллограф активизируется и создается ряд массивов, которые видны в окне рабочего пространства системы MATLAB, которое показано на рис. 4.52 слева. Справа виден график, построенный по полученным от осциллографа данным. Сравнение его с реальной осциллограммой (рис. 4.51) указывает на их полную идентичность. Из массивов наиболее важными являются `ydata` (значения координат точек осциллограмм по вертикали) и `xdata` (координаты точек по горизонтали). Важны также значения переменных масштаба и смещения по вертикальной и горизонтальной осям, положения нуля на горизонтальной оси, частота отсчетов `Fs` и число гармоник `NFFT`. Они обеспечивают реконструкцию полученных от осциллографа данных, что и позволяет строить рисунок осциллограммы в графическом окне MATLAB.

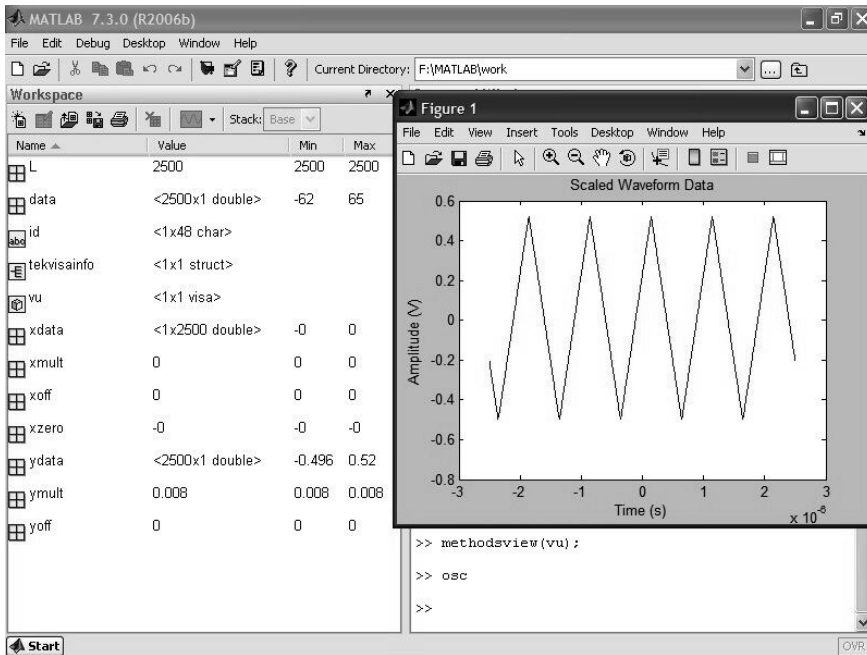


Рис. 4.52. Данные и график осциллограммы в системе MATLAB

Вполне возможно считывание данных автоматических измерений осциллографа. Например, для считывания двойной амплитуды сигнала, представленного осциллограммой, перед последней строкой приведенной выше программы достаточно вставить фрагмент:

```
%Считывание данных измерения – двойной амплитуды
fprintf(vu, 'MEASU:IMM:SOU CH1 ');
fprintf(vu, 'MEASU:IMM:TYP PK2 ');
pk2pk = query(vu, 'MEASU:IMM:VAL? ');
```

Тогда исполнение команды `OSC` даст вывод значения двойной амплитуды:

```
>> osc
pk2pk =
1.0320000648E0
```

В данном случае на вход осциллографа был подан синусоидальный сигнал от генератора AFG3101 с двойной амплитудой 1 В.

4.4.4. Спектральный анализ осциллограмм в MATLAB

С полученными от осциллографа данными можно выполнять любые операции, которые предусмотрены в системе MATLAB и в десятках пакетов расширения этой мощной системы компьютерной математики. Покажем это на весьма важных примерах проведения *спектрального анализа* полученной осциллограммы различными методами, которые не реализованы в самом приборе и позволяют расширить его возможности.

К примеру, осциллографы TDS1000B/2000B не предусматривают возможность проведения спектрального анализа в линейном масштабе (задан только логарифмический). Ниже представлена программа (M-файл) `spec_1`, выполняющая вычисление и построение графика спектра с линейным масштабом для сигнала, отсчеты которого хранятся в векторе `ydata`:

```
%Вычисление и построение спектра в линейном масштабе
Y = fft(ydata,NFFT)/L;           %Задание БПФ
f = Fs/2.*linspace(0,1,NFFT/2); %Создание вектора
                                %частот
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2)))      %Построение графика
                                %спектра
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Y(f)|')
```

Для проведения спектрального анализа сигнала, осциллограмма которого имеется на экране осциллографа, необходимо вначале выполнить команду `OSC` (данные от осциллографа вводятся в MATLAB) и, после просмотра графика сигнала, команду `spec_1`. График будет заменен спектрограммой.

На рис. 4.53 показан пример импорта осциллограммы прямоугольного импульса — сигнала от генератора AFG3101 корпорации Tektronix. Масштаб по горизонтали выбран так, чтобы с одной стороны было представлено большое число периодов сигнала, а с другой стороны была видна форма импульсов.

На рис. 4.54 показан спектр прямоугольных импульсов с коэффициентом заполнения 10% и амплитудой 1 В. Он четко представляет гармоники спектра. В частности, отчетливо видно, что спектр имеет только нечетные гармоники, амплитуда которых

убывает как $1/k$, где k — номер гармоники. Это полностью соответствует теоретическим представлениям о спектре меандра. Спектр характеризуется очень малым уровнем шума.

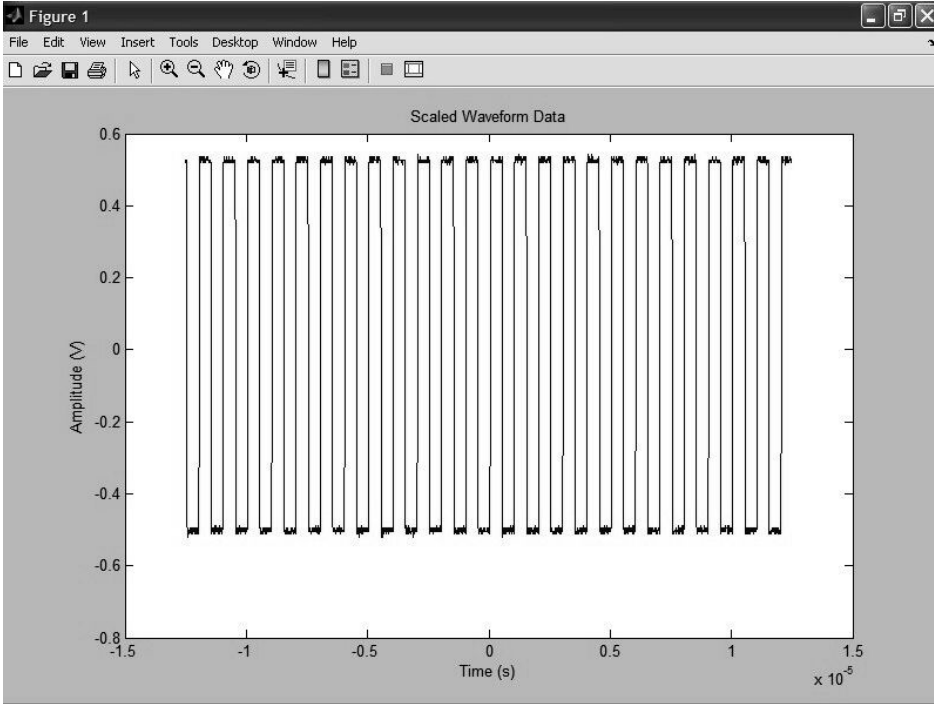


Рис. 4.53. Пример импорта прямоугольного импульса и построения его графика

На рис. 4.55 показана осциллограмма синусоидального сигнала с частотой 1 МГц, засоренная шумом (сигнал получен также от генератора AFG3101). Масштаб по горизонтали выбран так, что осциллограмма выглядит просто как шумовая дорожка — никаких признаков наличия синусоидального сигнала не наблюдается.

На рис. 4.56 показан спектр сигнала, изображенного на рис. 4.55. Весьма отчетливо видна единственная спектральная линия с пиком на частоте 1 МГц. Таким образом, в данном случае отчетливо выделен сигнал синусоидальной формы. О его синусоидальности говорит практически полное отсутствие других гармоник.

После того как данные сигнала осциллографа помещены в рабочее пространство (память) системы MATLAB командой `OSC`, над ними можно проводить операции как с помощью программных модулей (см. примеры выше), так и командами, вводимыми в командном окне. Например, следующие команды обеспечивают получение спектрограммы (периодограммы) с окном Блэкмана-Харриса:

```
>> w = blackmanharris(2500);
>> periodogram(ydata,w,2500, Fs);
```

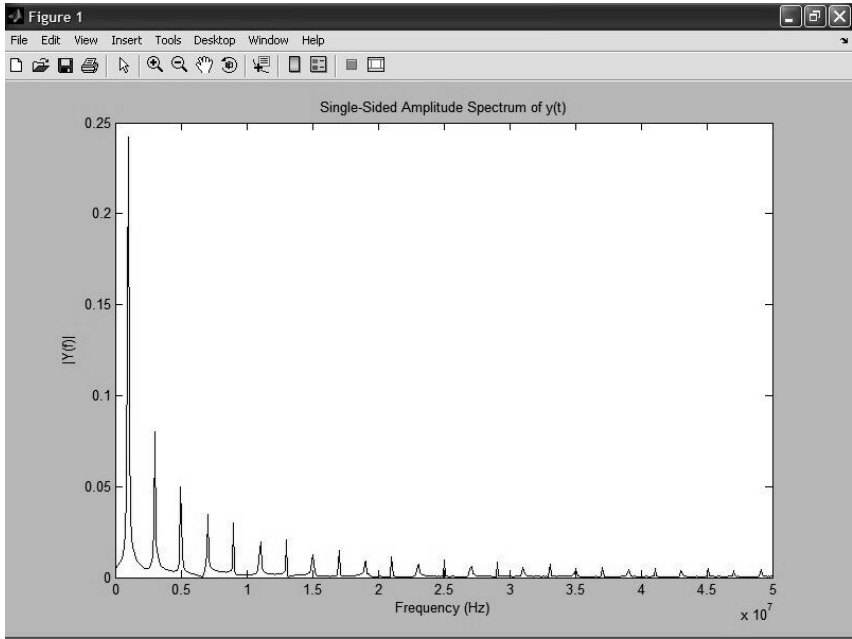


Рис. 4.54. Спектр прямоугольного импульса (рис. 6.44)

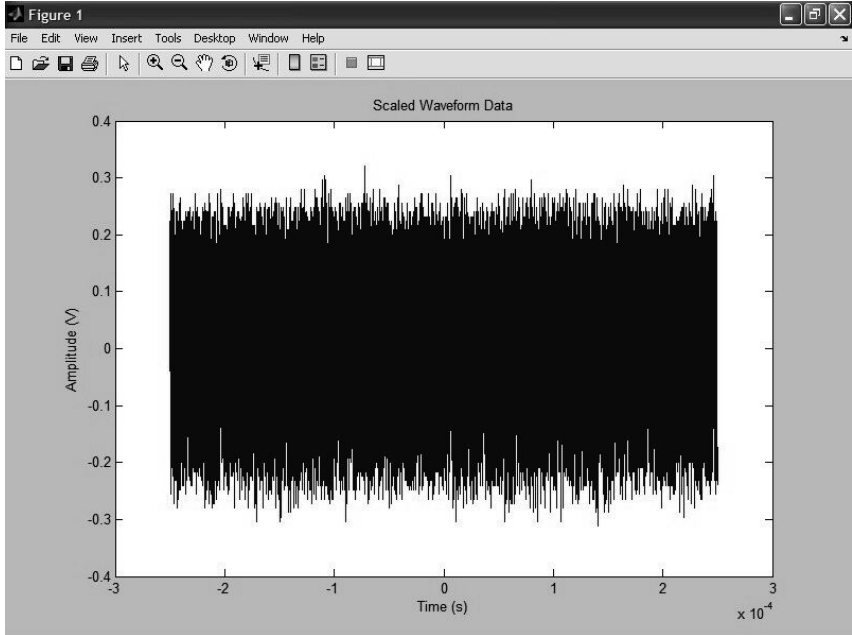


Рис. 4.55. Осциллограмма зашумленной синусоиды при большой длительности развертки

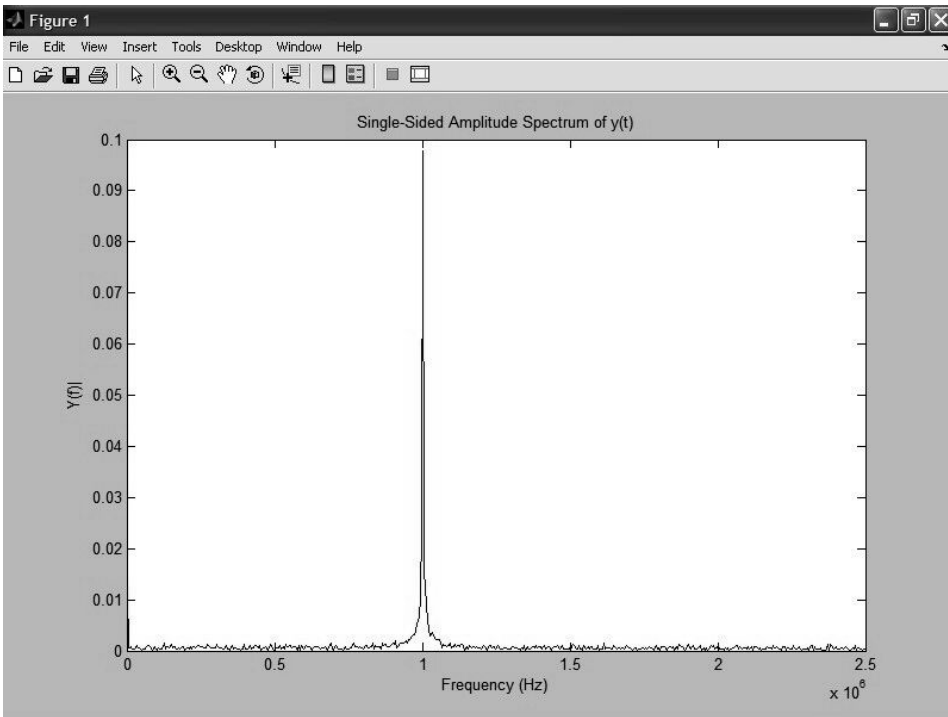


Рис. 4.56. Спектр сигнала, показанного на рис. 4.55

Для прямоугольного импульса с частотой 1 МГц и коэффициентом заполнения 5% периодограмма показана на рис. 4.57. В данном случае вычисляется спектр мощности сигнала в логарифмическом масштабе, что дает очень широкий динамический диапазон периодограммы, в который входят и шумовые компоненты. Окно Блэкмана-Харриса эффективно выделяет гармоники спектра и подавляет шумовые компоненты. Уровень собственных боковых лепестков у этого окна ослаблен более чем на 100 дБ.

4.4.5. Построение спектрограмм осциллограмм в MATLAB

К сожалению, временное положение компонент сигнала обычный спектральный Фурье-анализ не выявляет. Для наглядной иллюстрации этого зададим (с помощью генератора AFG3101) сигнал в виде пачки из 10 периодов синусоидального зашумленного сигнала. После исполнения команды `OSC` получим данные осциллограммы в рабочем пространстве MATLAB. Для получения осциллограммы и спектра в данном случае воспользуемся мощным средством пакета расширения Signal Processing Toolbox — инструментом анализа сигналов, фильтров и спектров `SPTool`. Запустив его командой `sptool`, можно из его окна загрузить массив `udata` и наблюдать как сам сигнал, так и его спектр (см. рис. 4.58) при разных установках и разных видах спектрального анализа.

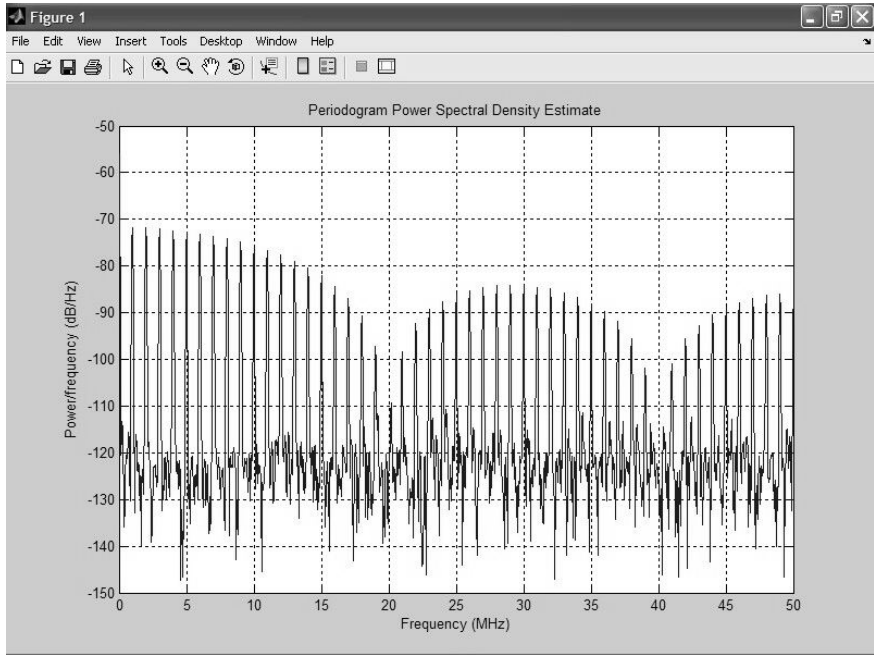


Рис. 4.57. MATLAB-периодограмма прямоугольного импульса

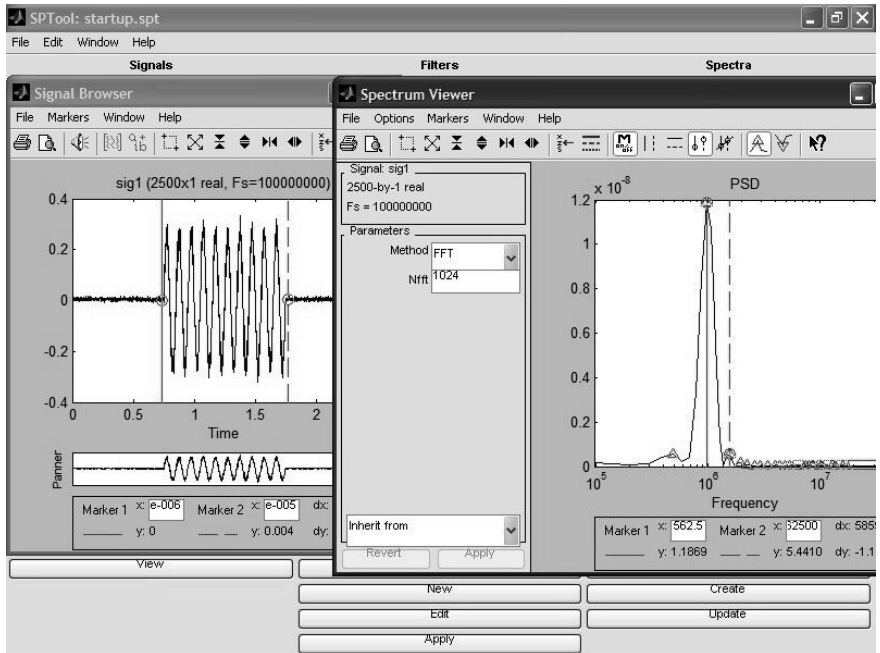


Рис. 4.58. Пример просмотра радиоимпульса и построения его спектра

Высокая спектральная линия на спектрограмме отчетливо видна и говорит о наличии синусоидального сигнала с частотой 1 МГц. Однако о местоположении сигнала во времени и о его длительности спектрограмма не дает никаких намеков, хотя в этом средстве можно проводить спектральный анализ многими методами.

Функция `spectgram` обеспечивает выполнение *скользящего оконного БПФ* и построение *спектрограммы* в плоскости частота-время с разбивкой времени на ряд участков, размер которой задается размером скользящего окна и длительностью сигнала. Интенсивность спектральных составляющих определяется цветом прямоугольников, из которых состоит спектрограмма. Например, для сигнала на рис. 4.58, выполнение команды

```
>> spectgram(ydata, 128, Fs)
```

создает спектрограмму, показанную на рис. 4.59. На ней среди шумовых компонент (хаотично разбросанные прямоугольники разного цвета) отчетливо выделяется область времени, в которой расположена компонента сигнала в виде пачки синусоид. Хорошо видно, что эта область занимает отрезок времени от 7,5 до 17,5 мкс, т. е. местоположение основной компоненты сигнала и ее длительность четко определяются и совпадают с положением пачки синусоид на рис. 4.59. В указанной области снизу отчетливо видна сплошная темно-коричневая линия синусоидальной составляющей с частотой 1 МГц. На синусоидальность ее указывает отсутствие высших гармоник.

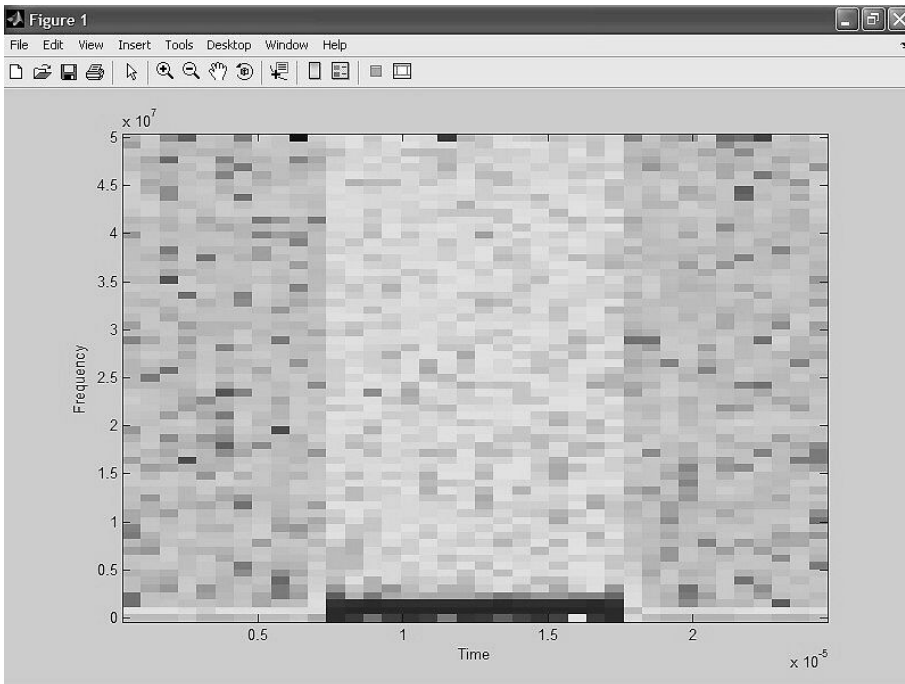


Рис. 4.59. Спектрограмма радиоимпульса

Поскольку ширина данной области равна 10 мкс, то из спектрограммы ясно, что компонента сигнала является пачкой из 10 синусоид! Спектрограммы со скользящим временным окном, таким образом, отчетливо выделяют особенности сигнала во временной области и позволяют оценивать параметры сигнала (начало появления его компонент, их длительность, временное положение), которые невозможно оценить обычным преобразованием Фурье. В некоторых случаях, как в приведенном примере, возможно даже выявление формы сигнала.

Приведенные примеры из области спектрального анализа демонстрируют лишь малую часть весьма обширных средств системы MATLAB, расширяющих возможности осциллографов. Так, для проведения спектрального анализа MATLAB имеет целый ряд функций, например оконного спектрального анализа с почти 20 видами окон. Для сравнения отметим, что спектральный анализ с помощью осциллографов TDS1000B/2000B возможен только при трех окнах. Есть даже функции спектрального анализа на основе новейших *вейвлет-преобразований* [5] и проектирования фильтров. Возможности математической обработки сигналов и осциллограмм практически не ограничены.

Впрочем, нельзя не отметить и серьезное ограничение описанного подхода — обрабатываются только отдельные фрагменты сигналов, которые задаются осциллограммой, представляющей сигнал в определенном промежутке времени. Это значит, что работа в реальном масштабе времени не обеспечивается.

В последнее время большой интерес представляет вейвлет-анализ и синтез сигналов по новому математическому базису *вейвлетов* (коротких "волночек"). Он пригоден для нестационарных сигналов. Однако рассмотрение теории и практики применения вейвлет-анализа и синтеза сигналов далеко выходит за рамки тематики данной книги. Заинтересованный читатель может ознакомиться с ним в книге автора [108]. В ней впервые описаны пакеты расширения по вейвлетам систем компьютерной математики Mathcad, Mathematica и MATLAB.

4.4.6. Управление генераторами серии AFG3000 от матричной системы MATLAB

Опишем программирование форм сигналов для генераторов AFG3000 с помощью матричной СКМ MATLAB. Для обеспечения работы ArbExpress с СКМ MATLAB надо включить генератор AFG3000 и, после загрузки микропрограммного обеспечения, нажать кнопку меню Сервис. Необходимо записать идентификационный номер USB-порта, через который генератор подключается к компьютеру. Далее нужно переключить генератор в режим генерации произвольных функций (активизацией кнопки Произвольн. режимов работы) и загрузить программы ArbExpress и MATLAB.

Для обеспечения связи между программами ArbExpress имеет в каталоге Program Files\Tektronix\ArbExpress\tools\Matlab набор из нескольких функций, заданных в виде файлов с расширением .p. Их назначение можно найти в фирменном описании

программы. На интернет-сайте корпорации Tektronix выложена доступная для загрузки несколько расширенная версия комплекта функций для совместной работы программ ArbExpress и MATLAB R2006b.

Ниже представлен конкретный пример программы на языке MATLAB, позволяющей задавать любую функциональную зависимость (в нашем случае синтез периода прямоугольного импульса по его первым четырем нечетным гармоникам с номерами 1, 3, 5 и 7). Эта программа вводится с помощью редактора М-файлов MATLAB [8] и сохраняется под каким-либо именем, например sample2.

Программа sample2 на языке MATLAB

```
echo off %Открытие сессии работы с генератором
s=NewSession('USB0::0x0699::0x0342::C010642::INSTR','usb');
[status,idn]=query(s, '*idn?');
status=write(s, 'Output1:State On');
%Создание 1000 точек заданной функции
i = [1:1000]; w=2*pi.*i./1000;
Data = sin(w)+sin(3.*w)./3+sin(5.*w)./5+sin(7.*w)./7;
plot(i,Data); %Построение графика сигнала
%Преобразование данных в содержимое памяти генератора
TransferWfm(s, 'example.wfm', Data, 1000);
%Закрытие сессии работы с генератором
CloseSession(s);
```

Важно в функции открытия новой сессии NewSession правильно указать идентификационный номер USB-порта (или LAN, GPIB) и обеспечить точное написание имен функций с учетом регистровой чувствительности новых реализаций MATLAB. Далее следует обеспечить активизацию подключения генератора к ПК, его идентификацию и соединение с компьютером с помощью окна программы ArbExpress File Transfer&Control (рис. 4.60). В подокне ArbList этого окна должна присутствовать ветвь с именем применяемого генератора (в нашем случае это AFG3101). Проверьте управление генератором с помощью программы ArbExpress — установка или снятие птички у опции Output On должно вызывать зажигание или потухание индикатора Output над входом генератора. После установки соединения активизацией кнопки Connect окно можно закрыть.

Теперь можно приступить к запуску программы sample2 в среде MATLAB (использована реализация MATLAB R2006b, предоставленная автору разработчиком системы — корпорацией MathWorks). Важно перед этим установить текущую директорию (окно Current Directory) на директорию, в которой хранятся файлы интерфейса программ (см. рис. 4.61). При запуске программа выводит окно графика заданного сигнала, пересылает данные сигнала во внутреннюю память генератора и заканчивается выводом приглашения >> в окне командного режима работы MATLAB.

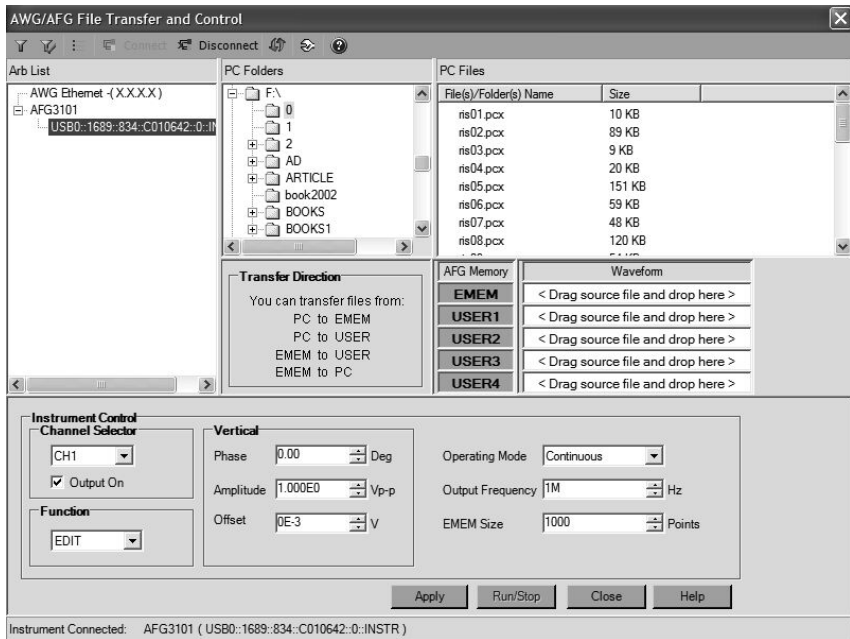


Рис. 4.60. Окно File Transfer&Control программы ArbExpress

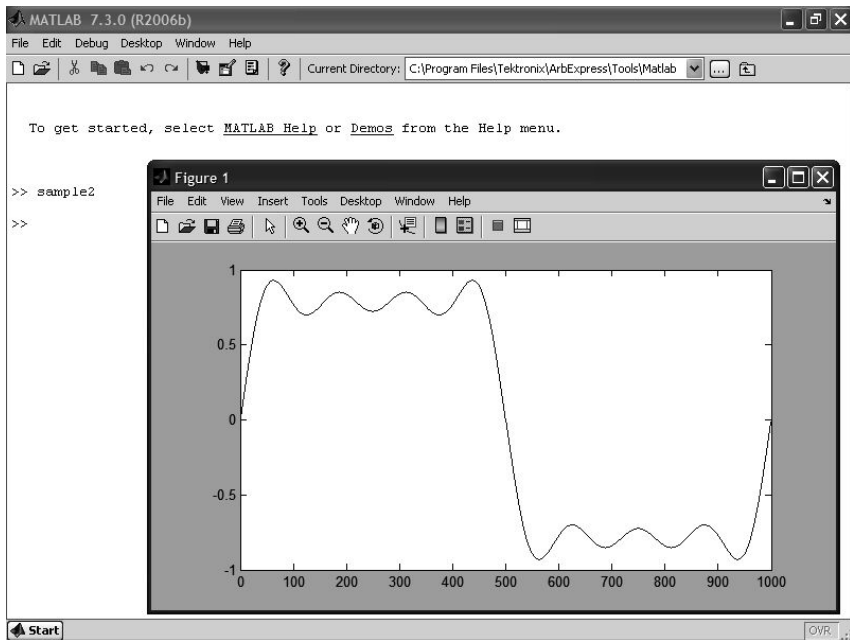


Рис. 4.61. Запуск программы simple2 в окне программы MATLAB и вывод графика заданного сигнала

По окончании работы программы на экране генератора появляется график заданного сигнала (рис. 4.62). Его сравнение с графиком рис. 4.61 демонстрирует их полную идентичность. Таким образом, задача задания сигнала в СКМ MATLAB и загрузки его в память генератора AFG 3101 полностью решена. Окно File Transfer&Control можно использовать для переноса файлов (перетаскиванием мышью) из памяти генератора (основной и USER1,2,3,4) в компьютер и наоборот. Можно менять параметры сигнала в нижней части окна, с фиксацией изменений нажатием кнопки Apply (Применить).



Рис. 4.62. Снимок экрана генератора AFG 3101 с графиком загруженного сигнала

4.4.7. Применение системы MATLAB при совместной работе генератора и цифрового осциллографа

На рис. 4.63 показана реальная осциллограмма сигнала с выхода генератора AFG3101, полученная с помощью цифрового осциллографа TDS2124B. Осциллограмма иллюстрирует полную идентичность представленных на рис. 4.61 и 4.62 сигналов, а также возможность получения непрерывного сигнала заданной формы. Рис. 4.63 демонстрирует проведение осциллографом пяти (из возможных 11) автоматических измерений сигнала.

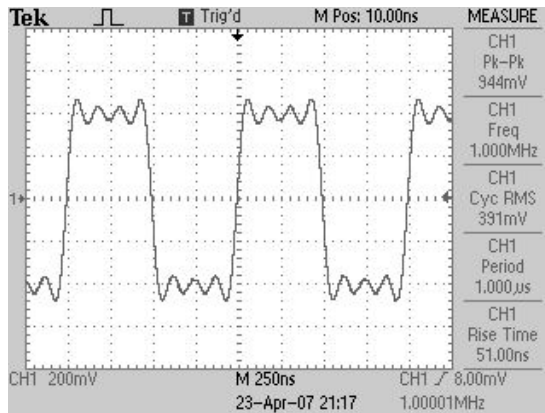


Рис. 4.63. Осциллограмма сигнала с выхода генератора AFG3101, отображаемая на экране цифрового осциллографа TDS2124B

Интересно построить спектр этого сигнала. Используя меню Math осциллографа, зададим построение FFT (БПФ) при заданном по умолчанию прямоугольном окне и использовании усреднения по 16 осциллограммам для уменьшения влияния шума. Представленная на рис. 4.64 спектрограмма, радует четким выделением всех четырех гармоник сигнала (1, 3, 5 и 7) и эффективным подавлением шума.

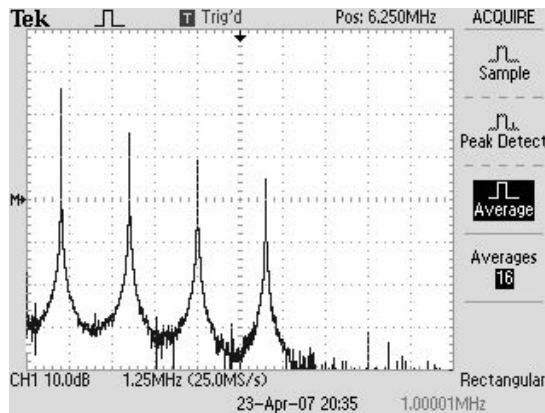


Рис. 4.64. Спектр заданного сигнала при прямоугольном окне, полученный с помощью цифрового осциллографа TDS2124B

Получение достаточно качественной картины спектров у массовых (бюджетных) осциллографов серии TDS-1000B/2000B кажется довольно неожиданным. Спектр простых сигналов при использовании других окон (см. рис. 4.65) у них выглядит почти как срисованный с учебников по спектральному анализу. Этому удивляться не стоит — недорогие приборы этих серий являются новейшей разработкой корпорации Tektronix, и она постаралась включить в них лучшие алгоритмы обработки сигналов для получения спектров.

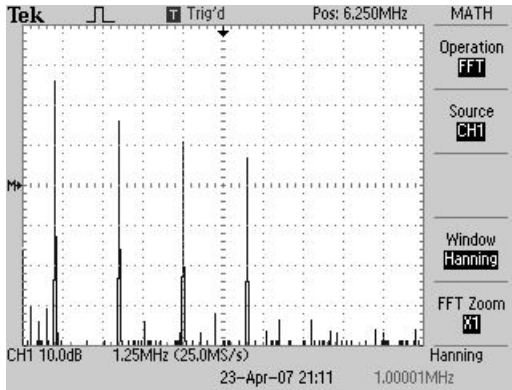


Рис. 4.65. Спектр заданного сигнала, полученный с помощью цифрового осциллографа TDS2124B, при использовании окна Хэннинга

Обширные возможности открывают системы компьютерной математики в обработке сложных, например, телекоммуникационных сигналов. На рис. 4.66 показан пример построения трехмерной глазковой диаграммы осциллографом серии TDS7000

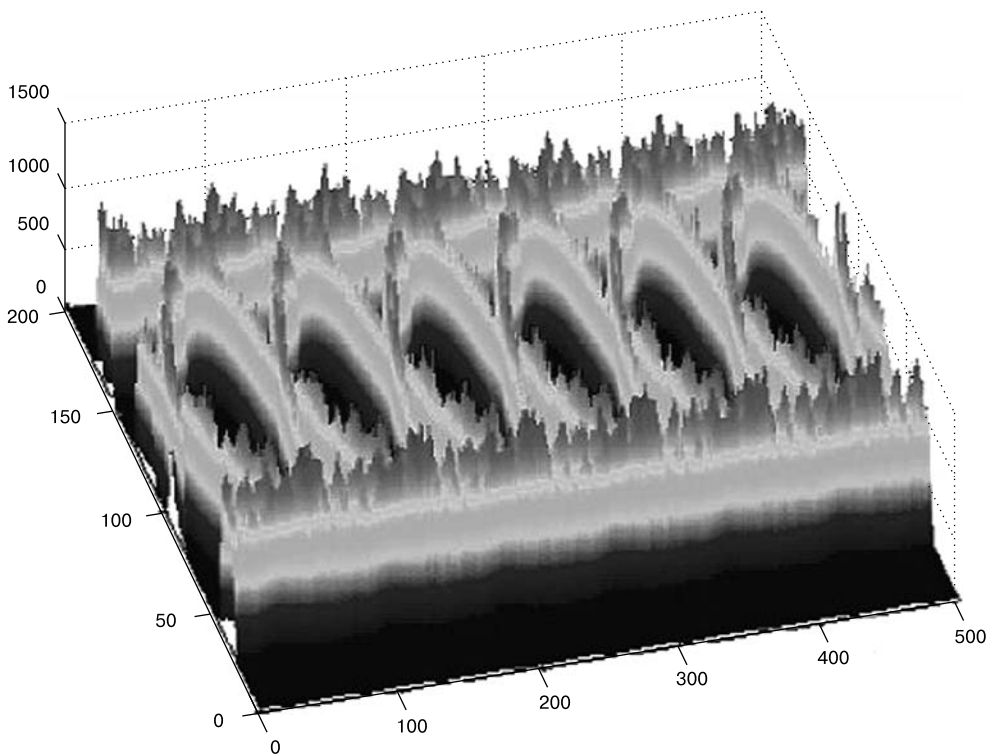


Рис. 4.66. Трехмерная глазковая диаграмма, полученная осциллографом серии TDS7000 и системой компьютерной математики MATLAB

с помощью загруженной на его жесткий диск системой MATLAB с расширением Signal Processing Toolbox. Прямая работа системы MATLAB с измерительными приборами обеспечивается пакетом расширения Instrument Control Toolbox. Поставляемые с приборами корпорации Tektronix программные средства OpenChoice и TekVisa также обеспечивают программный интерфейс профессионального уровня с системами компьютерной математики Excel, MATLAB и Mathcad и даже с текстовым процессором Word.

Выше мы рассмотрели лишь наиболее принципиальные вопросы применения компьютерной математики в измерительных приборах. Уже сейчас набор их средств огромен и включает в себя эффективные средства измерений и графической визуализации сигналов, построение специальных (в том числе трехмерных и динамических) спектрограмм и т. д. Для этого используются созданные на основе СКМ MATLAB, Mathcad и Mathematica пакеты расширений.

4.5. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG

4.5.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG

Как уже отмечалось, генераторы класса AWG (Arbitrary Waveform Generator), в отличие от генераторов класса AFG (рис. 1.27), основаны на более простом способе задания адресов (рис. 1.28), что обеспечивает получение сигналов типовых форм, но несколько меньшие возможности управления ими [112]. Корпорация Tektronix ранее выпускала серии таких генераторов AWG400/500/700. В настоящее время они заменены серийно выпускаемыми генераторами серий AWG5000/7000 [113, 114]. Высокие (до 20 Гвыб/с) скорости выборки у приборов AWG7000 достигнуты за счет применения технологии сверхбыстрых переключающих гетероприборов на германие и арсениде галлия.

Сравнительные характеристики генераторов серий AFG и AWG представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Основные параметры генераторов произвольных и смешанных сигналов корпорации Tektronix'

Тип генератора	Скорость дискрет.	$F_{\text{макс}}^{\text{синус}}$ Гвыб/с	Число каналов	Ур-р, В/бит	Габариты, Мм	Масса, кг
AFG3021	0,25	25	1	10/14	156×330×154	4,5
AFG3022	0,25	25	2	10/14	156×330×154	4,5
AFG3101	0,25	100	1	10/14	156×330×154	4,5
AFG3102	0,25/1	100	2	10/14	156×330×154	4,5
AFG3251	0,25/2	240	1	5/14	156×330×154	4,5
AFG3252	0,25/2	240	2	5 /14	156×330×154	4,5
AWG7051	5	156,25	1 + 2 м	2/10	465×245×500	19

Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG

Тип генератора	Скорость дискрет.	$F_{\text{макс}}$ синус Гвыб/с	Число каналов	Ур-р, В/бит	Габариты, Мм	Масса, кг
AWG7052	5	156,25	2 + 4 м	2/10	465×245×500	19
AWG7101	10	312,5	1 + 2 м	2/10	465×245×500	19
AWG7102	10/20	312,5	2 + 2 м	2/10	465×245×500	19
AWG5002	1,2	37,5	2 + 4 d	4,5/14	465×245×500	19,5
AWG5004	1,2	37,5	4 + 8 d	4,5/14	465×245×500	19,5
AWG5012	0,6	18,75	2 + 4 d	4,5/14	465×245×500	19,5
AWG5014	0,6	18,75	4 + 8 d	4,5/14	465×245×500	19,5

Буква м указывает на маркерные выходы, d — на цифровые выходы.

Для уменьшения шума квантования у генераторов класса AWG на выходе ЦАП используется фильтр, срезающий высокие частоты и уменьшающий ступенчатость выходных импульсов. Однако это препятствует получению импульсов с предельно малой длительностью фронтов. Поэтому предусмотрено отключение фильтра для получения таких импульсов.

4.5.2. Генераторы серии AWG7000

Внешний вид полной серии генераторов AWG7000 [113] представлен на рис. 4.67. В отличие от генераторов серии AFG3000 генераторы AFG7000 являются довольно громоздкими и тяжелыми стационарными приборами. Это не удивительно, если учесть уникальные характеристики этих приборов: они предназначены для формирования сложных сигналов произвольной формы при рекордных значениях скорости выборки, достигающих 20 Гвыб/с у старой модели этой серии AWG7102.

Серия генераторов AWG7000 представлена четырьмя моделями: AWG7102, AWG7101, AWG7052 и AWG7051. Две из них одноканальные, а две — двухканальные. Двухканальные модели позволяют формировать сигналы с разными параметрами на обоих основных выходах — как асинхронные, так и синхронные.

Передняя панель и органы управления у генераторов серии AWG7000 (рис. 4.68) напоминают таковые для генераторов AFG3000. Управление прибором кнопочное, но есть и универсальная поворотная ручка.

Для создания сложных сигналов генераторы позволяют создавать их образцы (шаблоны или паттерны) и сохранять их в памяти и в виде файлов. Генераторы оснащены 10,4-дюймовым сенсорным жидкокристаллическим дисплеем, который наряду с отображением различных установок позволяет отображать форму генерируемых сигналов.

На рис. 4.69 показан вид окна генератора AWG7102. С первого взгляда становится ясно, что генератор работает под управлением встроенного в него компьютера с операционной системой класса Windows. В верхней части окна расположено традицион-

ное меню. Значительную часть экрана занимает окно просмотра сигналов, которые генерирует генератор. Остальные элементы окна контекстно-зависимые, они могут отражать текущие настройки и установки генератора, их важнейшие параметры и т. д. Как и у генераторов AFG3000, интерфейс генератора AWG7000 интуитивно понятен, хотя и не так просто, как у AFG3000.



Рис. 4.67. Внешний вид генераторов серии AWG7000 корпорации Tektronix

Длина сигнала у генераторов этого типа может достигать 32 400 000 точек, но с опцией 01 может быть увеличена вдвое. Такая огромная длина сигнала означает, что с помощью генераторов серии AWG7000 можно формировать сложнейшие тестовые сигналы с десятками миллионов перепадов. При этом частота таких сигналов в целом и в их фрагментах может намного превышать частоту стандартных сигналов (например, синусоидальных), которые встроены в память прибора.

Фильтр на выходе ЦАП у генераторов AWG7102 ограничивает аналоговую полосу пропускания на уровне 750 МГц, что позволяет формировать импульсы без заметных шумов квантования с временем нарастания 350 пс. При отключении фильтра в режиме прямого выхода с АЦП аналоговая полоса расширяется до 3,5 ГГц, а время нарастания импульсов (на уровнях отсчета от 20 до 80%) уменьшается до 75 пс. Наконец, с опцией 02 ВЧ-выхода полоса расширяется до 5,8 ГГц, а время нарастания уменьшается до 42 пс. Амплитуда импульса 2 В. На рис. 4.70 показан сигнал генератора для имитации цифровой системы передачи данных со скоростью 5 Гбит/с.



Рис. 4.68. Внешний вид и органы управления генератором AWG7102



Рис. 4.69. Окно дисплея генератора AWG7102

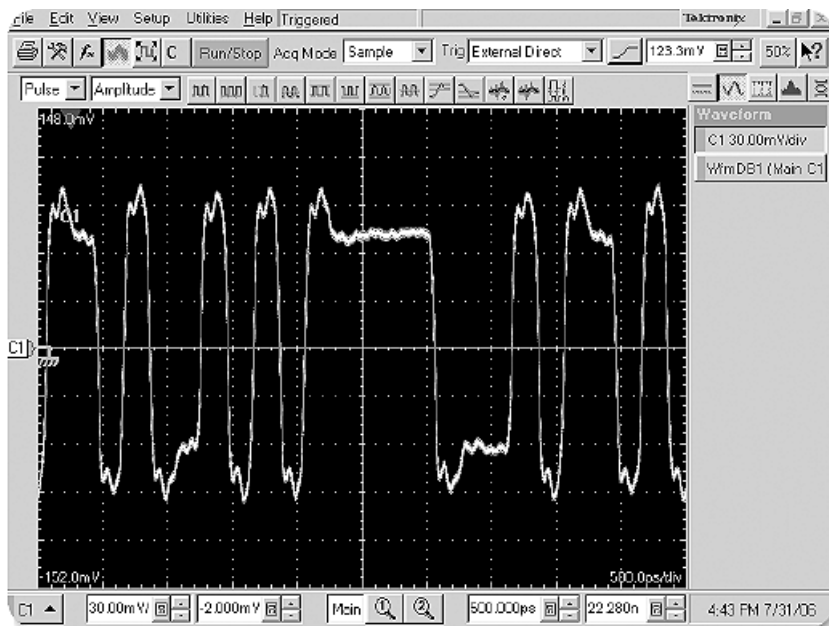


Рис. 4.70. Осциллограмма сигнала от генератора AWG7000 для имитации работы цифровой системы передачи данных со скоростью 5 Гбит/с

Генераторы AWG7000 имеют 10-битовое кодирование по уровню сигнала, а в случае использования так называемых *маркерных выходов* (по 2 на каждый каналный выход) разрядность кодирования снижается до 8, но это позволяет получать на маркерных выходах дополнительные цифровые сигналы и применять генераторы как источники *смешанных сигналов* — аналоговых и логических (цифровых). В ряде случаев они заменяют весьма редкие и дорогие генераторы логических сигналов, необходимые для тестирования и отладки логических и цифровых устройств высокого быстродействия. Осциллограммы импульсов смешанных сигналов показаны на рис. 4.71.

Генераторы имеют встроенный персональный компьютер с операционной системой Windows XP. Это позволяет использовать для задания нужных форм импульсов программы компьютерной математики, такие как Excel, MATLAB и Mathcad.

4.5.3. Генераторы серии AWG5000

Новейшая серия генераторов AWG5000 (ее выпуск объявлен в марте 2007 г.) построена на основе платформы AWG7000. Как видно из табл. 4.1, новые приборы двух- или четырехканальные [114]. Выход каждого канала дополнен двумя *маркерными выходами* цифровых сигналов. Кроме того, возможно расширение числа цифровых выходов до 28. Таким образом, при разработке новой серии генераторов упор сделан на увеличение чис-

ла каналов и получение смешанных сигналов. Это позволяет использовать генераторы для отладки систем, для испытания которых нужны одновременно аналоговые и цифровые сигналы.



Рис. 4.71. Осциллограммы импульсов смешанных сигналов (сигнал маркерного выхода показан снизу)

Внешний вид генераторов серии AWG5000 представлен на рис. 4.72. Он имеет много общего с внешним видом генераторов серии AWG7000, примерно одинаковы габариты приборов и их масса. Приборы имеют сенсорный дисплей с размером по диагонали 10,4 дюйма. Это позволяет управлять ими не только органами передней панели и с ПК, но и с помощью палочки-стило и даже просто пальца.

Максимальная частота выборки у генераторов AWG5000 ограничена значениями 0,6 или 1,2 Гвыб/с, что на порядок меньше, чем у генераторов серии AWG7000. Это значит, что генераторы серии AWG5000 не рассчитаны на очень высокие частоты сигналов. Максимальный размер памяти отсчетов сигналов 16 Мбайт с возможностью расширения до 32 Мбайт. Разрешение по вертикали соответствует 14 бит, но уменьшается при применении маркерных выходов, полезных при генерации многоканальных сигналов.

Приборы обеспечивают выходной сигнал с амплитудой до 4,5 В (от пика до пика) или до 9 В при дифференциальном выходе при сопротивлении нагрузки 50 Ом и времени нарастания прямоугольных импульсов 0,95 нс (при отсчете на уровнях 10 и 90% от амплитуды). Сигнал на маркерных выходах имеет амплитуду до 3,7 В на нагрузке 50 В и время нарастания до 300 пс (на уровнях 20 и 80% от амплитуды) при уровне сигнала

до 1 В. Аналоговая полоса частот у этих генераторов с фильтром равна 250 МГц, без фильтра — 350 МГц.



Рис. 4.72. Внешний вид серии генераторов AWG5000

К типовым видам модуляции (АМ, ЧМ, ФМ и импульсная) добавляется возможность осуществления квадратурной модуляции высокого качества, а также возможность создания ряда сигналов для типовых применений импульсов — запуска светодиодов, индикаторных панелей, АЦП и ЦАП и т. д.

Генераторы также оснащены 10,4-дюймовым сенсорным жидкокристаллическим дисплеем, который наряду с отображением различных установок позволяет отображать форму генерируемых сигналов. Вид экрана генератора в режиме редактирования форм сигналов показан на рис. 4.73.

Генераторы серии AWG5000 заменяют ранее выпущенные генераторы серий AWG400/500. Они являются идеальным решением для испытания и отладки современной цифровой аппаратуры, например программно-определяемой радиосвязи (software defined radio), беспроводных систем связи WIMAX и WiFi, MIMO и UWB.

Генераторы имеют встроенный персональный компьютер с операционной системой Windows XP. Это позволяет использовать для задания нужных форм импульсов программы компьютерной математики, такие как Excel, MATLAB и Mathcad. Для подключения к внешнему ПК генераторы имеют 6 портов USB и интерфейсы GPIB и LAN. Приборы имеют съемный жесткий диск, CD-RW и DVD-R приводы и порты для подключения клавиатуры и мыши.

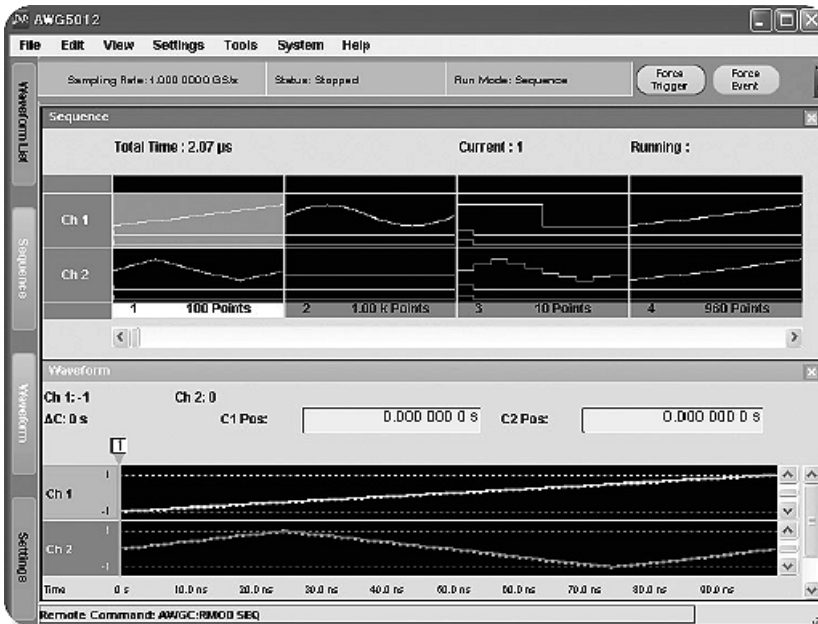


Рис. 4.73. Вид экрана генератора AWG5012 в режиме редактирования сигналов

4.6. Генераторы цифровых сигналов произвольной формы

4.6.1. Функциональная схема генератора паттернов данных

К отдельной разновидности генераторов сигналов произвольной формы относятся генераторы класса Data Pattern Generator — *генераторы паттернов данных*. Паттерны данных представляют собой многоканальные наборы данных, имитирующих сигналы логических и цифровых устройств. Такие генераторы составляют часть анализаторов логических состояний цифровых устройств, но существуют и как самостоятельные приборы. К примеру, корпорация Tektronix выпускает серии DG таких генераторов.

Функциональная схема генераторов этого класса показана на рис. 4.74. Центральным узлом генераторов этого класса является память паттернов. С помощью генератора адресов из памяти последовательностей извлекаются типовые последовательности адресов, и из памяти образцов выбирается нужный набор, из которого формируются импульсы одного канала. Как правило, все подобные генераторы многоканальные.

Генераторы паттернов данных достаточно сложные и дорогие приборы. Они используются в лабораториях, где ведутся серьезные разработки цифровых и логических устройств, а также в промышленности на предприятиях, производящих такие устройства. Определенную конкуренцию этим приборам ныне составляют многочисленные приставки к ПК, выполняющие функции анализаторов логики.

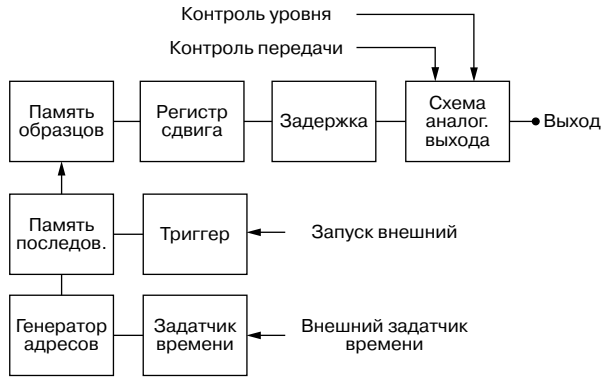


Рис. 4.74. Функциональная схема генератора паттернов данных

4.6.2. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG2020A

Генераторы DG2020A относятся к наиболее простым представителям генераторов произвольных цифровых сигналов — паттернов. Внешний вид генератора DG2020A показан на рис. 4.75. Для расширения числа выходов генератора используются приставки, подключаемые к прибору кабелем.



Рис. 4.75. Генератор Tektronix DG2020A с приставками расширения

Генераторы имеют скорость передачи данных до 200 Мбит/с и рассчитаны на создание логических и цифровых сигналов с умеренной скоростью передачи. Длина паттернов составляет 64 Кбит на канал. Число каналов у генератора DG2020A составляет 12, 24 или 36. Предусмотрен точный контроль состояний, уровня и временной задержки сигналов. Уровень сигналов до 5 В (от пика до пика), время перехода из одного состояния в другое 2 нс. Возможен импорт паттернов с помощью программы DG-link и интеграция с ПУ с помощью интерфейсов GPIB и RS-232C.

Вид экрана генератора показан на рис. 4.76. Здесь представлено формирование данных в виде шестнадцатеричного HEX-кода.

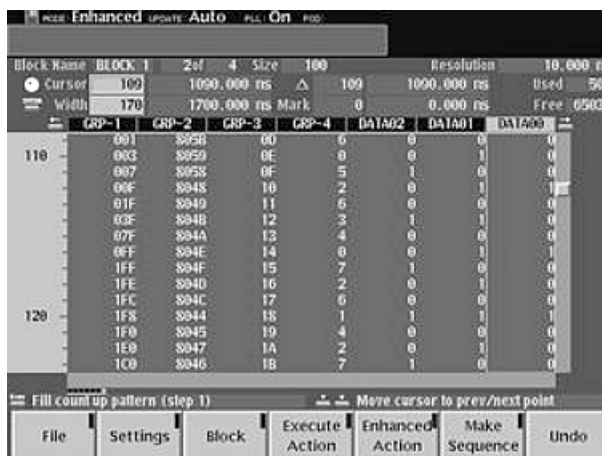


Рис. 4.76. Вид экрана генератора DG2020A в режиме просмотра и редактирования шестнадцатеричного HEX-кода. Диаграммы можно создавать различными способами, в том числе и их программированием с использованием для этого операторов переходов и циклов.

А на рис. 4.77 представлены временные диаграммы сигналов по всем каналам генератора. Временные диаграммы сигналов могут импортироваться из файлов и экспортироваться в файлы для их сохранения и последующего применения. Для этого служит программа DG-Link.

4.6.3. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG5078/5274/DTG5334

Генераторы серии DG5078/5274/DTG5334 являются комбинацией источников цифровых сигналов (паттернов), импульсных сигналов и сигналов постоянного напряжения. Внешний вид серии генераторов представлен на рис. 4.78.

Генераторы этого типа высокоскоростные, и способны формировать логические сигналы со скоростью передачи 3,35 Гбит/с при использовании от 1 до 96 каналов. Разрешение по времени составляет 0,2 пс (DTG5274/DTG5334) и 1 пс (DTG5078), вре-

менная задержка может устанавливаться до 600 нс. Длина паттерна для каждого канала может достигать 64 Мбайт. Амплитуда выходного сигнала контролируется с разрешением в 5 мВ. Вид экрана генератора DTG5000 с видимыми на нем формами генерируемых импульсных последовательностей показан на рис. 4.79.

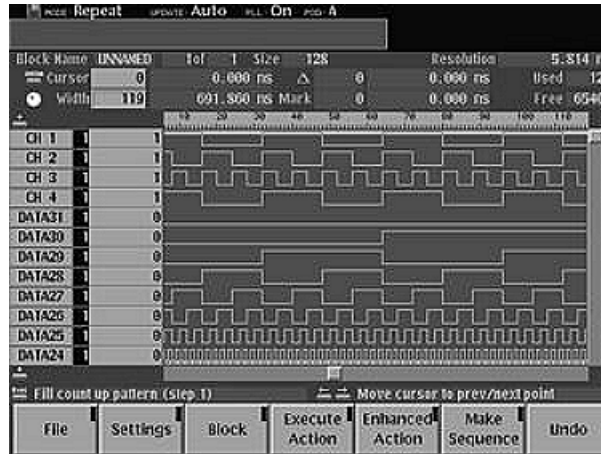


Рис 4.77. Вид экрана генератора DG2020A с временными диаграммами сигналов



Рис. 4.78. Внешний вид серии генераторов DG5078/5274/DTG5334

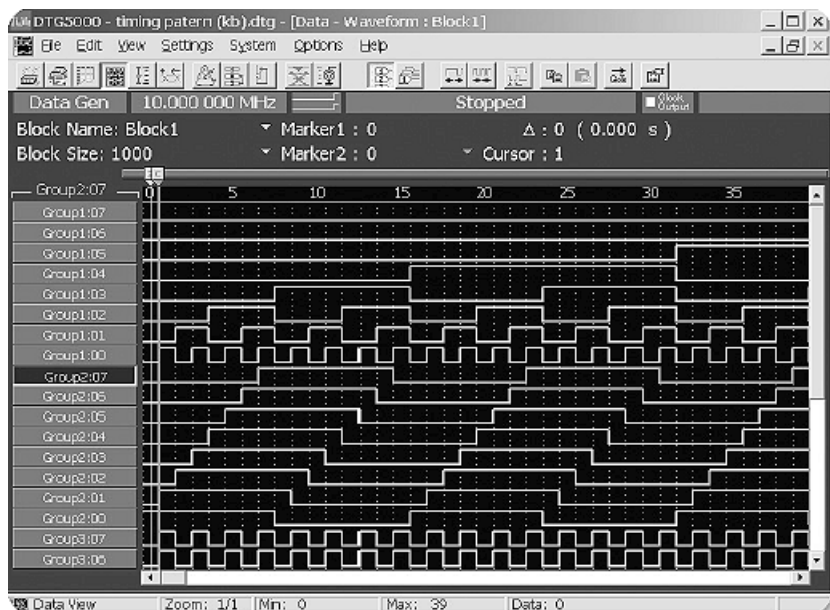


Рис. 4.79. Вид экрана генератора DTG5000

Генераторы имеют модульную конструкцию, обеспечивающую легкое наращивание числа каналов и реализацию различных возможностей генераторов. Например, с помощью модулей DTGM31 и DTGM32 можно ввести в сигналы заданную временную нестабильность — джиттер.

Основные применения генераторов этой серии:

- контроль высокоскоростных полупроводниковых устройств;
- поддержка устройств, выполненных на микросхемах от TTL (ТТЛ) до LVDS;
- отладка высокоскоростных системных шин PCI-Express;
- контроль последовательных скоростных интерфейсов Serial ATA;
- исследование и отладка магнитных и оптических устройств записи информации;
- испытание высокоскоростных устройств преобразования информации;
- исследование, проектирование и тестирование новой генерации HDD, DC/DVD, Blue-ray и др.;
- имитация джиттера и испытание цифровых и логических устройств на чувствительность к джиттеру.

Генераторы имеют встроенные компьютеры. Для интеграции с внешними ПК генераторы имеют ряд средств: встроенные накопители на гибком диске и CD-ROM, стандартные интерфейсы локальной сети LAN и порты последовательной шины USB.

Наряду с их собственным программным обеспечением все генераторы серий AWG500/7000, DTG5000 и ряда других моделей поддерживаются ранее описанной программой

ArbExpress. Список поддерживаемых моделей генераторов содержится в окне их выбора, представленном на рис. 4.80.

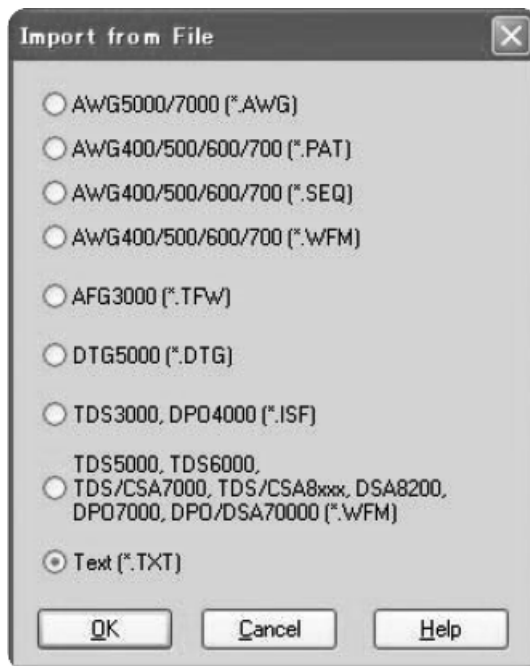


Рис. 4.80. Окно выбора моделей генераторов программы ArbExpress

Программа поддерживает также импорт сигналов от ряда осциллографов фирмы Tektronix. Работа программы была детально описана выше на примере применения массовых генераторов произвольной формы AFG3000 и осциллографов TDS 1000B/2000B.

4.7. Программа NI Signal Express Tektronix Edition

4.7.1. Назначение программы

Поставляемая на CD-ROM программа *NI Signal Express Tektronix Edition* является вариантом программы экспресс-анализа сигналов NI Signal Express фирмы National Instruments, специально ориентированным для работы с осциллографами корпорации Tektronix. Предоставляемая в комплекте с осциллографами версия программы работает как профессиональная версия в течение месяца, а затем становится "стандартной", точнее говоря, сильно урезанной версией. Для возобновления ее полноценности надо оплатить компании National Express стоимость профессиональной версии (около \$ 1 000). Про-

грамма поддерживает также работу с генераторами серии AFG3000, обеспечивая дистанционное управление ими от компьютера. Поскольку возможности программы близки к возможностям ранее описанной программы Open Choice Desktop, отразим их менее подробно.

4.7.2. Выбор и запуск программы

Если программа NI SignalExpress Tektronix Edition установлена вместе с программой Open Choice Desktop, то при подключении приборов к компьютеру появляется окно выбора рабочей программы. Это окно показано на рис. 4.81.

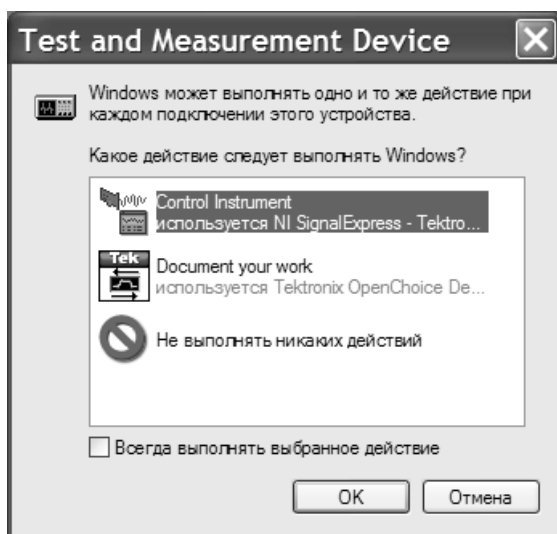


Рис. 4.81. *Окно выбора программы*

При выборе программы NI SignalExpress Tektronix Edition появляется ее заставка, показанная на рис. 4.82. Она исчезает спустя несколько секунд и заменяется главным окном программы. Обычно подключенные к ПК приборы распознаются программой. Если это не произошло, то может появиться окно со списком приборов, в котором надо указать используемый прибор. В меню программы используемый прибор (в нашем случае TDS2000B) создает позицию со своими командами установки, сохранения установок и изображений и др.

Главное окно программы NI SignalExpress Tektronix Edition показано на рис. 4.83. На фоне этого окна появляется окно анимационного проигрывателя с небольшим и полезным уроком по применению программы. Просмотрев этот урок, можно наглядно убедиться в больших возможностях программы и получить представления о правилах работы с ней. Заметим, что профессиональная версия программы дает возможность применения множества приемов обработки данных, поступающих от осциллографов.

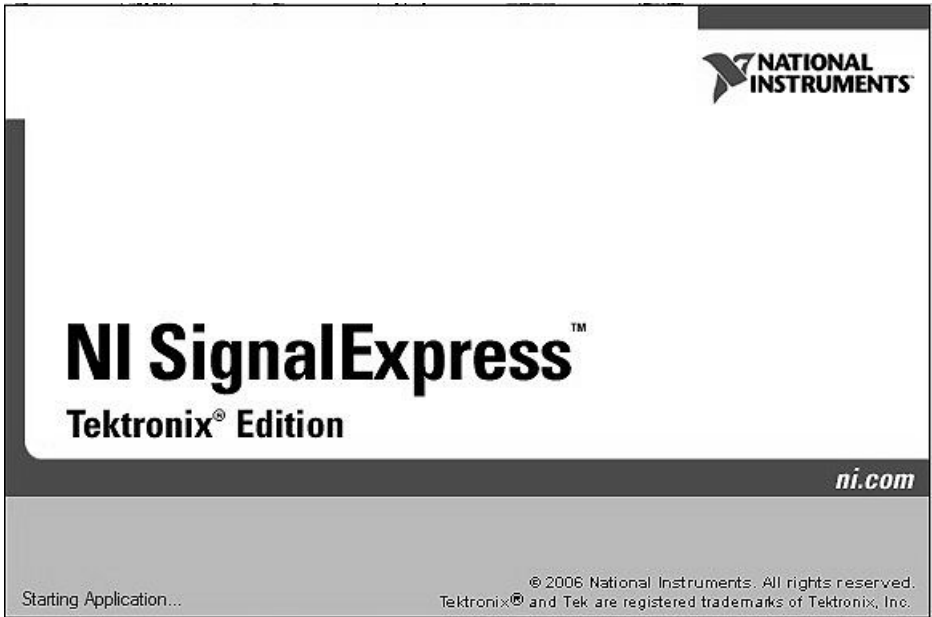


Рис. 4.82. Окно-заставка программы NI SignalExpress Tektronix Edition

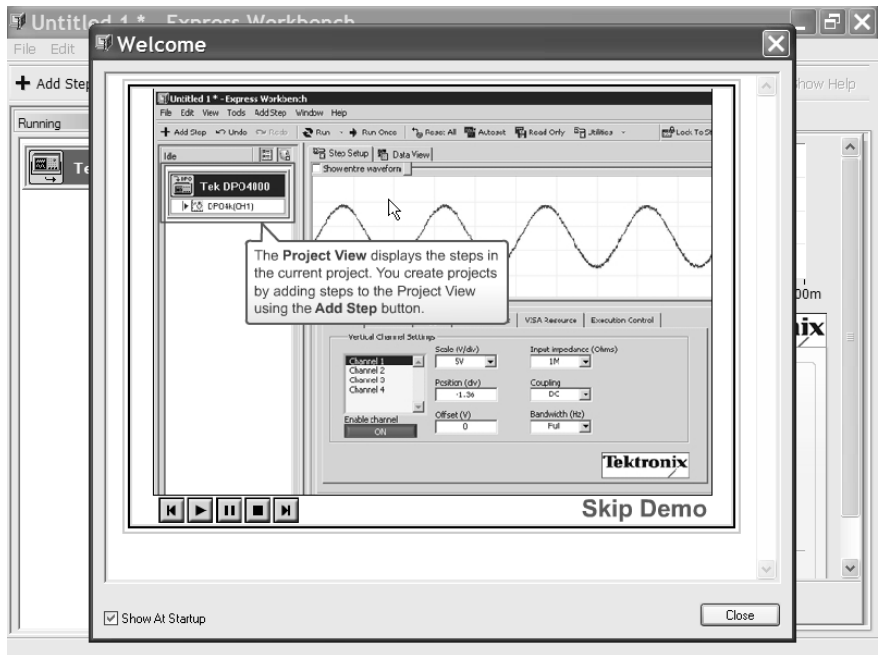


Рис. 4.83. Окно программы NI SignalExpress Tektronix Edition с окном анимационного проигрывателя урока по ее применению

4.7.3. Основное окно программы при работе с осциллографом

При желании можно убрать окно с демонстрацией возможностей программы, активизировав надпись **Skip Demo** (Пропустить Демонстрацию). Тогда появится окно задания нового проекта работы с программой New Project Wizard.... Это окно показано на рис. 4.84.

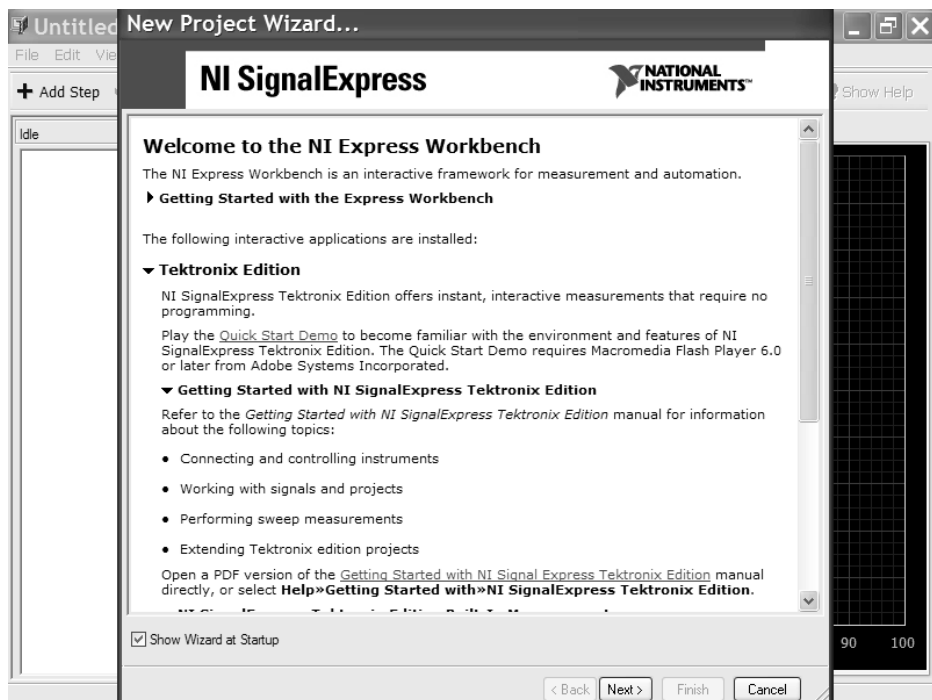


Рис. 4.84. Окно задания нового проекта

Ознакомившись с содержанием окна (его суть описана ниже), можно активизировать кнопку **Next** окна New Project Wizard.... Это приведет к появлению окна выбора прибора, с которым может работать программа (рис. 4.85).

После выбора прибора (например, осциллографа серии TDS2000B в нашем случае) надо активизировать кнопку **Next** для опознания подключенного прибора или кнопку **Finish** для завершения работы по созданию связи между прибором и программой.

Если процесс связи прибора с программой прошел успешно, то появится основное окно поначалу пустое. Оно содержит меню, панель инструментов и панель **Running**. С помощью команд в позиции меню **AddStep** можно задавать пошаговую работу с программой с отображением каждого шага в панели **Running**. Первым шагом является установка связи программы с выбранным прибором. На рис. 4.86 показан пример работы с программой после установления связи с осциллографом TDS2024B серии TDS2000B.

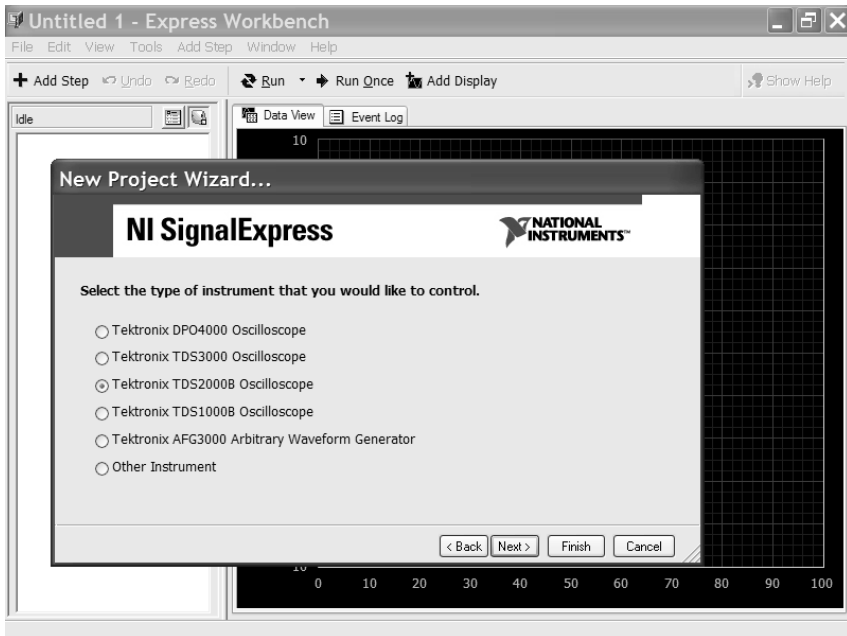


Рис. 4.85. Выбор прибора, с которым должна работать программа

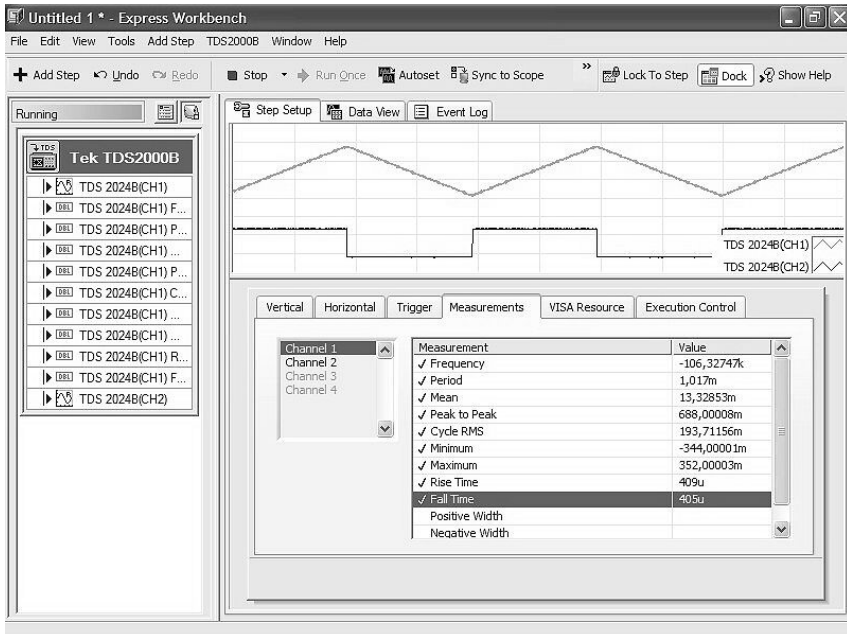


Рис. 4.86. Основное окно программы NI SignalExpress Tektronix Edition с осциллограммами и данными автоматических измерений

В основном окне можно получить копии осциллограмм с экрана осциллографа и под ними наблюдать все установки осциллографа и параметры исследуемых сигналов. Как пример, показаны результаты автоматических вычислений на вкладке Measurement. Если осциллограф отображает осциллограммы от генератора (именно этот случай показан на рис. 4.86), то программу можно использовать для контроля реальных сигналов генератора или испытуемого устройства.

4.7.4. Работа с инструментами программы

В позиции меню **Tools** (Инструменты) профессиональной версии программы имеется множество средств (инструментов) по обработке осциллограмм. С ними несложно познакомиться. В качестве примера на рис. 4.87 показана фильтрация сигнала первого канала (треугольных колебаний) цифровым фильтром — одним из многих, которые позволяет задавать данный набор инструментов.

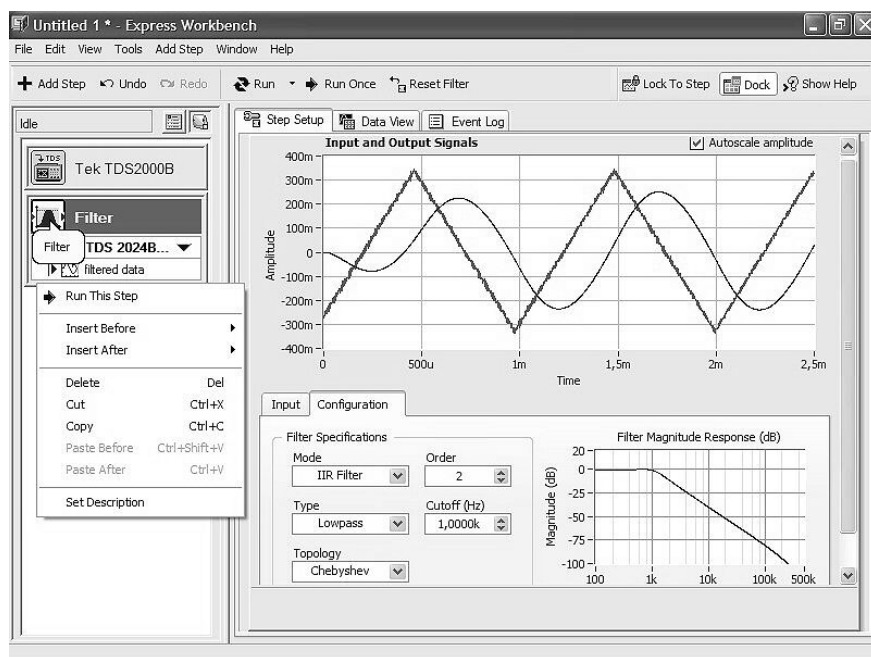


Рис. 4.87. Пример фильтрации сигнала в виде треугольных колебаний

Пример вывода изображений из файлов данных осциллографа представлен на рис. 4.88. Здесь наряду с основным средством — окном с зависимостями, полученными из данных, показаны дополнительные средства программы — окошко с данными сигнала канала CH1 и контекстное меню правой клавиши мыши, дающие доступ к

инструментам, доступным в данный момент. Нетрудно заметить, что интерфейс программы интуитивно понятный и соответствует канонам построения интерфейсов приложений для операционной системы Windows XP. Поэтому читатель может самостоятельно познакомиться и с другими возможностями программы SignalExpress Tektronix Edition.

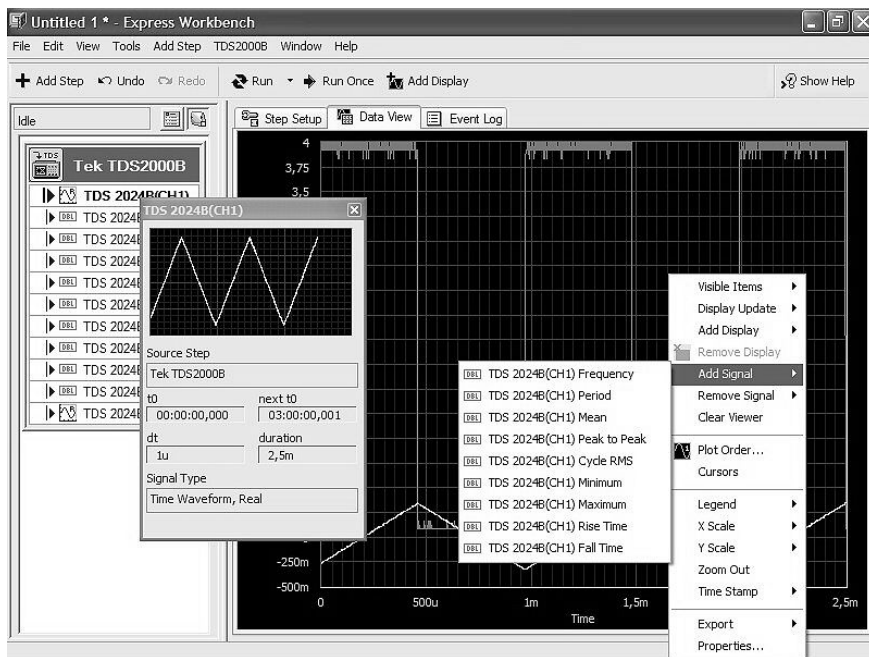


Рис. 4.88. Пример работы с данными, полученными от осциллографа TDS-2024B

4.7.5. Работа с генератором серии AFG3000

Для работы с генератором серии AFG3000 необходимо выбрать прибор в списке, показанном на рис. 4.85. Можно также выполнить команду Tek AFG3000. Доступ к ней представлен на рис. 4.89, на котором показано меню пошаговых операций **AddStep**.

Программа должна идентифицировать включенный генератор. На рис. 4.90 показан случай, когда генератор не опознан. В этом случае появляется восклицательный знак в красном кружке, как в левой панели, так и внизу основного окна. Кроме того, отсутствует идентификационный номер прибора на вкладке VISA Resource основного окна программы. Для опознания генератора надо активизировать кнопку Autodetect. Если и это не помогает, можно порекомендовать выключить генератор и снова его включить. При этом надо проследить за нормальным распознаванием генератора, как USB-прибора.

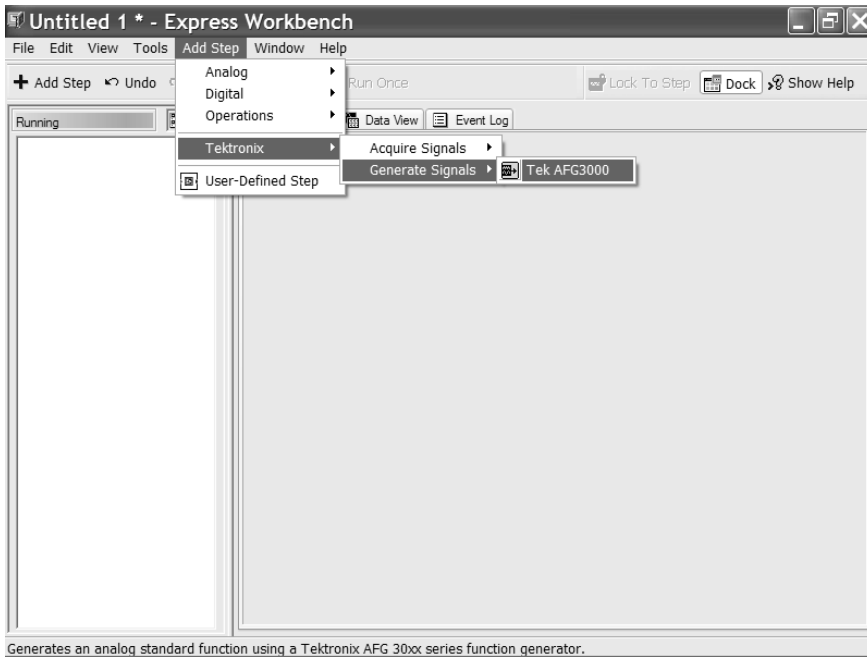


Рис. 4.89. Подготовка к выбору работы с генератором серии AFG3000

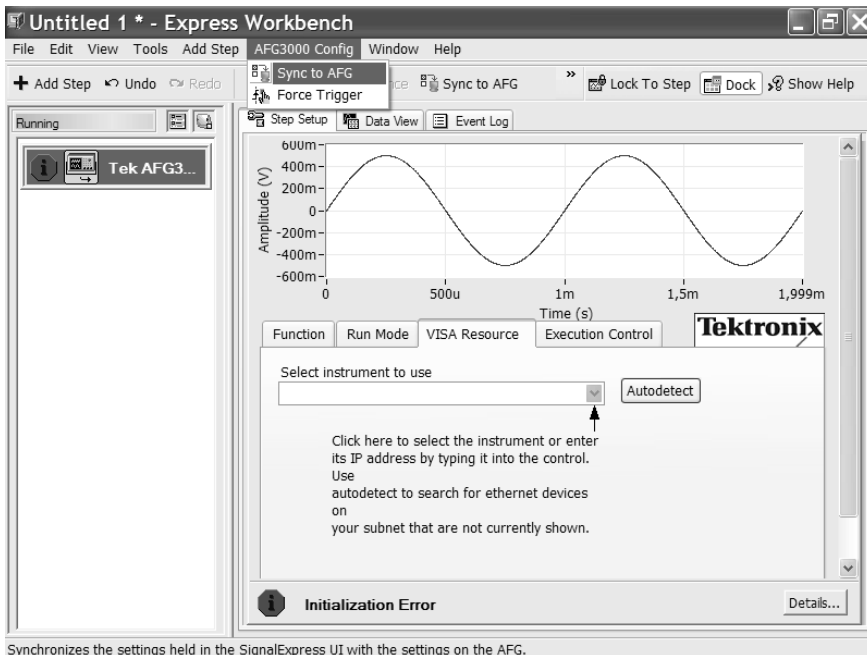


Рис. 4.90. Окно программы для случая опознавания генератора

Если генератор опознан, то окно программы приобретет вид, показанный на рис. 4.91. В левой панели окна могут быть несколько (в нашем случае их два) значка генератора. Один из них должен быть без указания на ошибку инициализации. Другие значки (шаги работы) могут быть удалены с помощью команды **Delete** контекстного меню правой клавиши мыши. На вкладке **Function** основного окна можно задать вид генерируемой функции, канал генератора и включение или выключение выхода генератора. При этом генератор управляется от программы и на нем устанавливается выбранный вид сигнала.

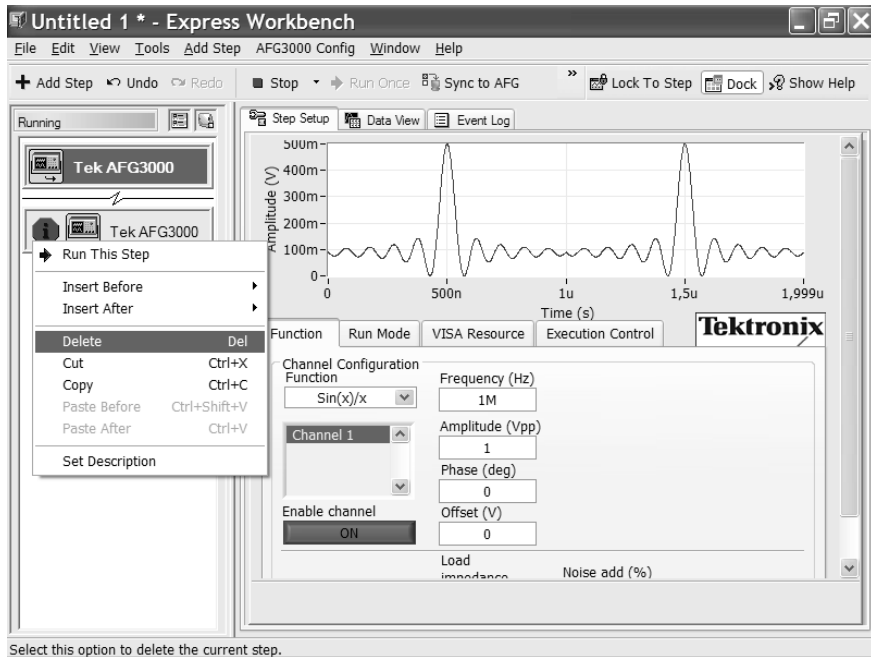


Рис. 4.91. Управление формой сигнала генератора с вкладки *Function*

Важной функцией программы является выявление идентификационного номера прибора — в данном случае генератора AFG3101. Этот номер появляется на вкладке **VISA Resource** (см. рис. 4.92). Напомним, что идентификационный номер необходим и для распознавания генератора другими программными средствами, например программой **MATLAB**.

Ряд установок генератора можно задать на вкладке **Run Mode** (рис. 4.93). Прежде всего, это установки непрерывного режима генерации, модуляции и генерации пакетов колебаний. Можно также установить тип модуляции, например амплитудная, частотная и др. Соответствующие установки действуют на генератор. Но, к сожалению, в окне графика его вид не меняется — график отображает только исходную форму модулируемого сигнала. Однако на экране генератора появляется установленная форма сигнала.

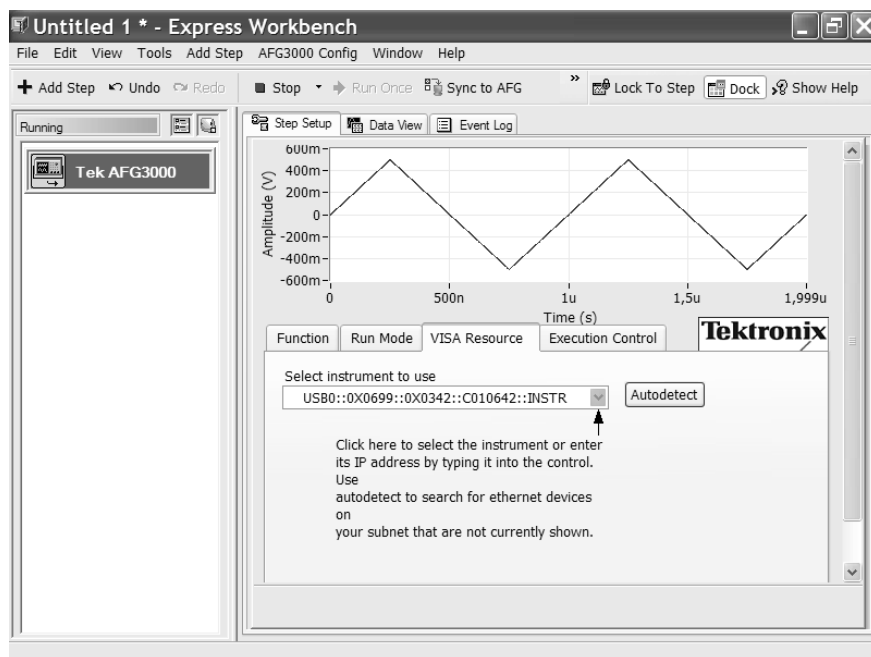


Рис. 4.92. Определение идентификационного номера генератора AFG3151

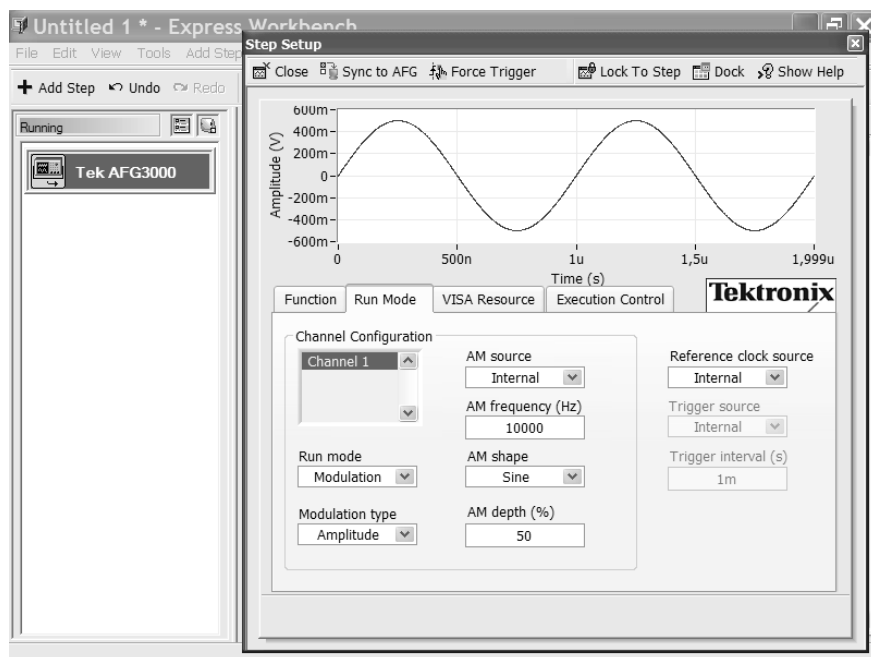


Рис. 4.93. Задание режимов работы генератора

4.7.6. Дополнительные возможности программы

Программа NI SignalExpress Tektronix Edition в полном варианте имеет ряд дополнительных возможностей по исследованию сигналов генератора. Однако, к сожалению, речь идет об исследовании идеализированных, а не реальных сигналов. Рассмотрим три дополнительные возможности — создание сигнала, изучение окон и получение спектра сигнала. С другими возможностями полной версии программы пользователь может ознакомиться самостоятельно.

На рис. 4.94 показано окно программы на шаге создания сигнала. Пример дан для сигнала прямоугольной формы — меандра. Тип сигнала выбирается из списка Type Signal. Под ним расположены установки амплитуды, частоты, фазы и смещения по вертикали для созданного сигнала.

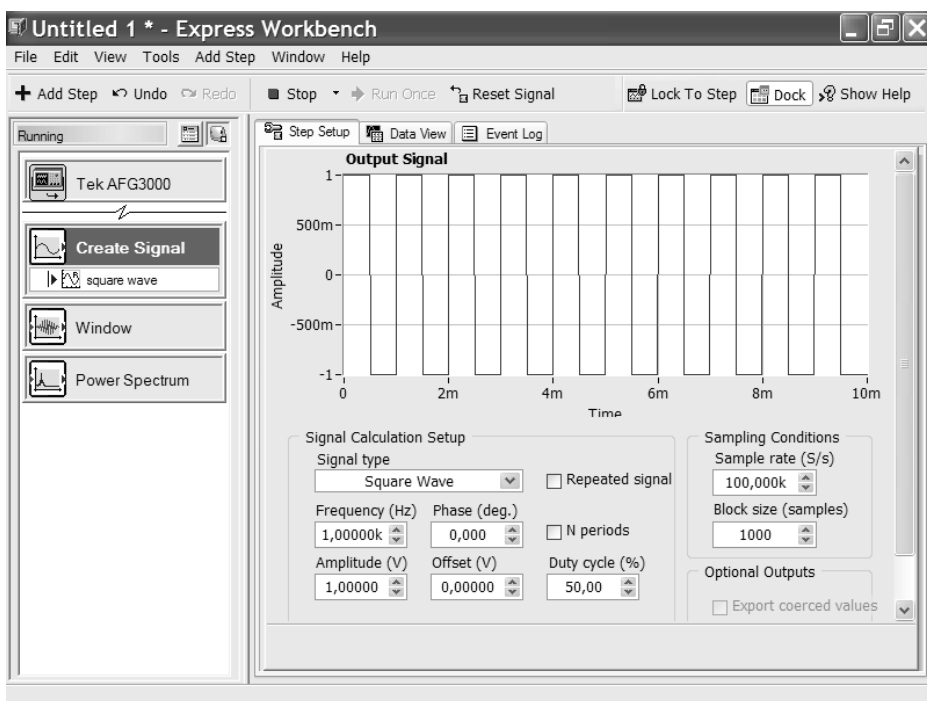


Рис. 4.94. Пример создания сигнала — меандра

Как уже отмечалось, при спектральном анализе сигналов применяются временные окна, вырезающие часть сигнала. Это позволяет устранить скачки сигнала в начале и в конце фрагмента сигнала, подлежащего спектральному анализу. Полезно ознакомиться со свойствами окон различного типа, поскольку от этого сильно зависит вид спектров сигналов. На рис. 4.95 показано окно программы для шага Window (Окно). На нем представлены данные (в том числе вырезка сигнала окном) для окна Блэмана-Харриса.

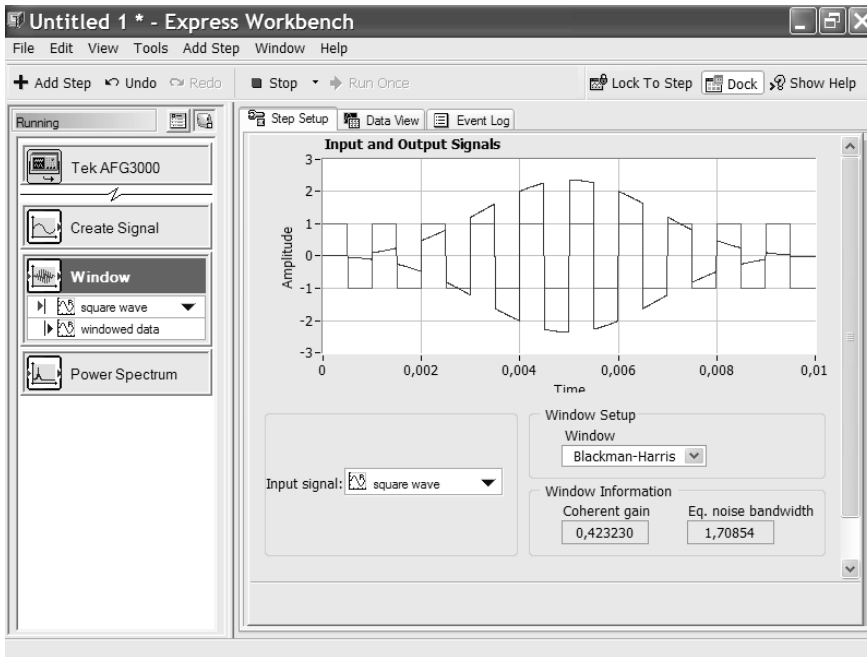


Рис. 4.95. Пример анализа окна Блэкмана-Харриса

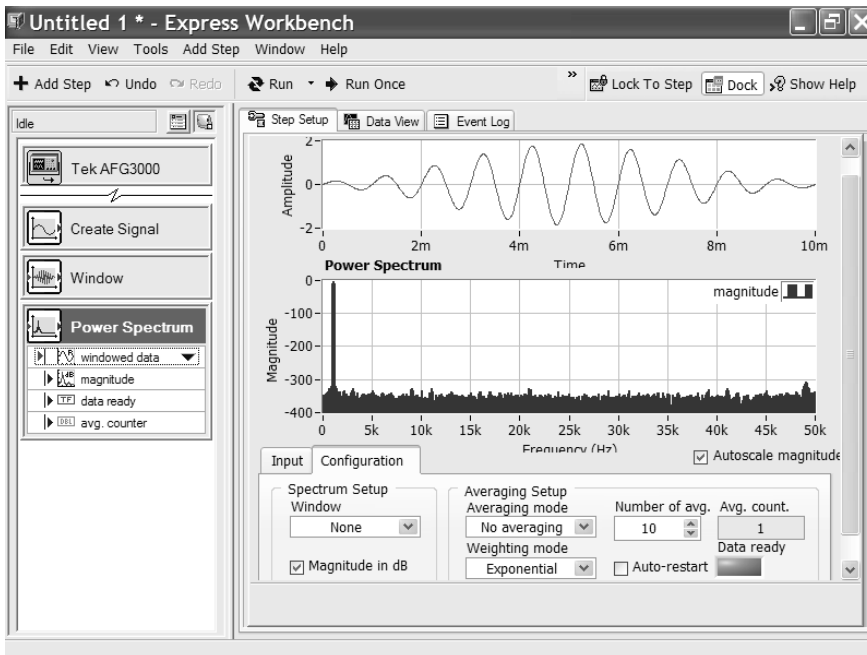


Рис. 4.96. Пример получения спектра мощности синусоидального сигнала

На рис. 4.96 показан пример построения спектра мощности синусоидального сигнала. Сверху основного окна представлен график вырезки сигнала окном, а под ним график спектра мощности сигнала. Тут уместно отметить еще раз, что это спектр идеализированного сигнала, а не реального сигнала от генератора. Если генератор исправен, то вид его сигнала достаточно хорошо соответствует идеализированному.

В целом возможности полной версии программы NI SignalExpress Tektronix Edition близки к возможностям программного комплекса OpenChoice и ArbExpress, поставляемого с приборами фирмы Tektronix. Однако этот комплекс поставляется в полной версии и обеспечивает возможность одновременной работы с осциллографами и генераторами.

Применение генераторов сигналов

В этой главе описаны различные применения современных генераторов сигналов для отладки и тестирования различных электронных устройств. Дано описание современных лабораторий для разработки электронных схем и устройств, в основном, на основе генераторов сигналов и осциллографов фирмы Tektronix, лидирующей в разработке и выпуске современных цифровых осциллографов и генераторов. Описаны измерения параметров генераторов и применение последних для тестирования и отладки различных радиоэлектронных систем и устройств.

5.1. Современная лаборатория разработчика электронных устройств

5.1.1. Назначение лаборатории

В последнее время у нас заметно оживился интерес к разработке электронных устройств. Ею занимаются как радиолюбители (начинающие и опытные), так и специалисты. Для настройки и тестирования современной электронной аппаратуры, проведения исследований в области радиоэлектроники и для изучения физических процессов в технических устройствах и системах требуются самые разнообразные электро- и радиоизмерительные приборы. В первую очередь, наряду со ставшими общедоступными мультиметрами, для *лаборатории разработчика электронных схем* нужны электронные осциллографы и источники сигналов самой разнообразной формы [102].

Невозможно в пределах одной книги отразить разнообразие вариантов построения лабораторий с применением огромного числа измерительных приборов самых различных фирм. Поэтому ниже описаны примеры создания некоторых типовых лабораторий на основе измерительных приборов корпорации Tektronix. Приборы этой фирмы широко распространены во всем мире и имеют нередко непревзойденные параметры. Тем не менее, выбор приборов этой фирмы не более чем пример удачного укомплектования лабораторий измерительными приборами. Разумеется, и приборы других ведущих фирм, например Agilent Technologies, ROHDE&SCHWARZ, LeCroy и других могут с успехом применяться в современных лабораториях.

Функциональная схема типичной лаборатории для исследования и тестирования электронных устройств показана на рис. 5.1. Основой лаборатории является генератор сигналов и осциллограф. Сигнал от генератора сигналов через канал передачи сигнала с его выходом подается на вход испытуемого устройства. Сигнал с выхода последнего подается на вход осциллографа — обычно цифрового. Для автоматизации измерений обычно приборы объединяются в локальную сеть с помощью интерфейсов GPIB/LAN. К ним может быть подключен и персональный компьютер — в последнее время для этого широко используется интерфейс универсальной последовательной шины USB.

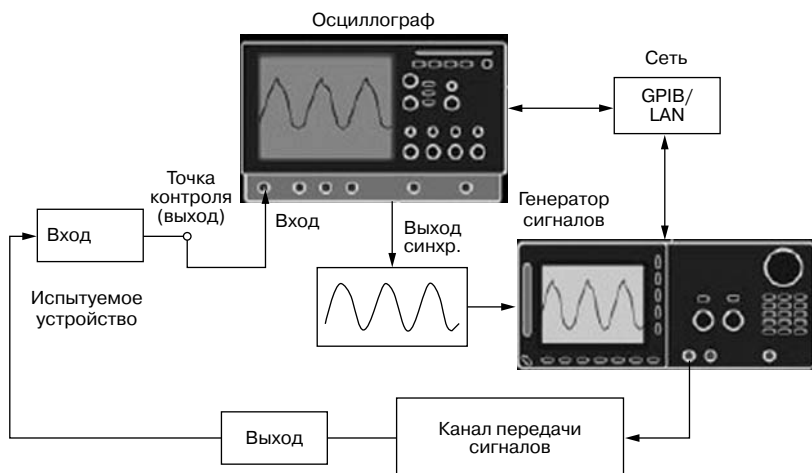


Рис. 5.1. Функциональная схема типичной лаборатории для исследования и тестирования электронных устройств

Выбор этих приборов в наше время весьма велик. К примеру, осциллографические приборы представлены ныне аналоговыми, аналого-цифровыми и цифровыми моделями, осциллографами смешанных сигналов, логическими анализаторами, анализаторами сигналов и спектров и т. д. Современные функциональные генераторы способны генерировать сигналы трех-пяти простых форм, таких как синусоидальная, прямоугольная и треугольная. Звуковые, ВЧ- и СВЧ-генераторы генерируют синусоидальные сигналы с высокой стабильностью в широком диапазоне частот. Однако это только очень малая часть сигналов, которые могут потребоваться в практике выполнения измерений и отладки сложных устройств и систем. Особенно это важно при технологических измерениях в промышленности, когда необходима высокая степень автоматизации измерений и быстрая перестройка параметров измерительной аппаратуры.

5.1.2. Лаборатория начального уровня

Для построения *лаборатории начального уровня* следует учитывать, что измерительные приборы — довольно дорогостоящие изделия. Минимум приборов в лаборатории на-

чального уровня включает в себя мультиметр, генераторы НЧ- и ВЧ-сигналов, импульсный генератор и универсальный или сервисный осциллограф. Вполне приличные, хотя уже не современные, НЧ- и ВЧ-генераторы советской разработки можно ныне приобрести через интернет-магазины ряда фирм. После распада СССР огромные складские запасы этих приборов оказались доступными и ныне распродают по вполне умеренным ценам.

Если качество сигналов не столь важно, то полезным может оказаться генератор синусоидальных колебаний с частотами от 0,1 до 150 МГц (с гармониками до 450 МГц) GRG-450В фирмы GoodWill (рис. 1.26 см. в разделе 1.5.4). Эта фирма, кстати, поставляет на наш рынок множество сравнительно дешевых (бюджетных) моделей измерительных приборов: генераторов различных сигналов, осциллографов, анализаторов спектра и др. На российском рынке можно найти подобные приборы и другой фирмы — МСР. Это ВЧ-генераторы HG-1500/1500D (см. раздел 1.5.3).

В качестве источника сигналов нескольких форм целесообразно приобрести функциональный генератор. Большинство таких генераторов генерирует сигналы синусоидальной, прямоугольной и треугольной форм в диапазоне частот от долей Гц до 2–5 МГц. Однако есть и модели с частотами до 15–20 МГц, например генераторы фирмы METEX MSG-9810A/9816A (частоты до 10/16 МГц). Объединение АКТАКОМ выпускает целую серию функциональных генераторов АНР-1001/1002/1003/1012 с диапазоном частот от долей Гц до 2, 15 и даже 20 МГц. Все эти приборы могут использоваться как генератор качающейся частоты для построения (совместно с осциллографом) измерителя амплитудно-частотных характеристик исследуемых цепей или схем.

К довольно дешевым осциллографам относятся китайские приборы серии МСР (ОСУ), например, 2-канальный 20 МГц осциллограф ОСУ-20. Даже в лаборатории начального уровня важной является передача результатов вычислений прямо в ПК. К сожалению, обычные осциллографы эту возможность не обеспечивают. Хотя у многих приборов предусмотрен выход аналогового сигнала с канала Y, который можно с помощью дополнительных плат дискретизировать и использовать для ввода в ПК.

Достаточно эффективную и не слишком дорогую лабораторию можно создать на основе виртуальных функциональных генераторов и осциллографов, выполненных в виде приставок к ПК. На нашем рынке представлены такие лаборатории на основе приставок к ПК фирмы Velleman и виртуальная лаборатория на базе прибора АСК-4106, который является комбинацией двухканального функционального генератора (частоты от Гц до 10 МГц) с двухканальным 100 МГц цифровым запоминающим осциллографом.

Обширная номенклатура виртуальных измерительных устройств выпускается под торговой маркой АКТАКОМ (www.aktakom.ru). Это 2–4-канальные аналоговые и цифровые осциллографы, генераторы, осциллографы смешанных сигналов, логические анализаторы, функциональные генераторы, генераторы телевизионных сигналов, управляемые от компьютера источники питания и другие приборы. Их стоимость заметно меньше таких специализированных приборов и они дают естественную возможность совместной работы с ПК с помощью специального, поставляемого с ними, программного обеспечения.

5.1.3 Лаборатория среднего уровня

Лаборатории среднего уровня для опытных радиолюбителей, научных и образовательных организаций должны быть обеспечены десятками различных измерительных приборов в соответствии с их профессиональной деятельностью. Попробуем оценить тот минимум приборов, который необходим для исследования и отладки устройств (схем) общего и промышленного применения, работающих в диапазоне частот от долей герца до 200–300 МГц. Заметим, что в этом диапазоне частот работает информационная часть бытовых электронных приборов, в частности радиоприемных и телевизионных устройств, DVD- и MP3-плееров, устройств силовой электроники и др. Эти частоты характерны и для радиотрактов радиовещательных и телевизионных приемников.

Прежде всего, в такой лаборатории нужны источники разнообразных сигналов. Это генераторы звуковых, инфразвуковых, ультразвуковых, ВЧ и СВЧ синусоидальных колебаний, генераторы импульсов различной формы, длительности и частоты, функциональные генераторы, генераторы качающейся частоты и, наконец, программируемые генераторы сигналов произвольной формы. Приобретение всех этих приборов не только влетит в копеечку (точнее, во многие тысячи долларов), но и потребует организации нескольких рабочих мест, заставленных всеми указанными приборами. А это далеко не всегда допустимо, поскольку площадь рабочих помещений в наше время стоит довольно дорого.

В последнее время появился реальный выход из этого положения. Корпорация Tektronix — один из лидеров в области разработки и производства высококачественных измерительных приборов, недавно выпустила на рынок серию генераторов произвольных сигналов AFG3000 (рис. 4.6) с умеренной (для этого класса приборов) стоимостью.

Выпускаются одноканальные и двухканальные приборы. Двухканальные генераторы способны формировать независимые сигналы по обоим каналам, в том числе и синхронные (например, дифференциальные или сигналы с заданным сдвигом фазы между ними). Возможна синхронная работа многих генераторов для создания нескольких серий сигналов. Основные технические характеристики разных моделей генераторов серии AFG3000 представлены на рис. 4.9.

Генераторы имеют самый современный, простой и наглядный *интерфейс пользователя*, подобный интерфейсу пользователя современных цифровых осциллографов. Большой жидкокристаллический цветной дисплей (только у модели AFG3021 он черно-белый) с размером по диагонали 5,6 дюйма отображает достаточно крупными знаками основные параметры сигналов и режимы работы генераторов и представляет форму создаваемых сигналов. Интерфейс генератора может иметь надписи на 8 языках, включая русский. Для изменения языка надписей на передней панели поставляется накладка, которая крепится на передней панели прибора. Таким образом, локализация приборов под условия России успешно решена.

У генераторов возможно изменение фазы синусоидального и иного периодического сигнала от $-180,00^\circ$ до $+180,00^\circ$, осуществление амплитудной, частотной и фазовой

модуляции, а также частотной манипуляции. Для импульсных сигналов возможна еще и широтно-импульсная модуляция, которая широко используется в преобразовательных устройствах для управления мощностью в нагрузке, например для изменения яркости свечения светодиодов или изменения температуры нагрева нагревателей в электрических печах.

Обновление *микропрограммного обеспечения* генераторов позволяет снизить минимальные частоты и разрешение по частоте до 1 мкГц и расширить диапазон изменения скважности импульсов. Возможна модуляция синусоидальных и других сигналов (кроме сигнала шума и постоянного напряжения).

Всего генераторы серии AFG3000 имеют 12 стандартных форм сигналов. Все они полезны и позволяют использовать генераторы для самых разнообразных сервисных, научных и учебных целей. Так, у импульсных сигналов отдельно регулируются время нарастания и спада, длительность и частота, коэффициент заполнения и временная задержка. Это позволяет использовать прибор как универсальный генератор импульсных сигналов трапецеидальной формы.

Инструкция по эксплуатации прибора, кстати, поставляемая и на русском языке, достаточно подробно описывает применение генераторов AFG3000 как самостоятельных приборов. Однако их возможности наиболее полно раскрываются при совместной работе с ПК. При этом возможно дистанционное управление генератором (в том числе по сети), задание и редактирование пользователем сигналов произвольной формы и генерация сигналов, полученных от цифровых осциллографов фирмы Tektronix. Для этого используется программа ArbExpress™, входящая в поставку генератора. Для использования этих возможностей требуется установка программы (вполне заурядная) и подключение генератора к свободному USB-разъему компьютера. Требования к ПК вполне обычные, и любой современный ПК им удовлетворяет.

Пожалуй, оптимальным (по возможностям и цене) типом осциллографа для данной лаборатории является цифровой запоминающий осциллограф из серии Tektronix TDS 1000B/2000B (рис. 5.2). Такой прибор лучше всего сочетается с генераторами серии AFG3000 по электрическим параметрам (прежде всего, диапазону частот исследуемых сигналов), а также и по типу подключения ПК (через скоростной USB-порт и шину) и по применяемому программному обеспечению. Приобретая осциллограф другой фирмы, вы рискуете потерей совместимости по программному обеспечению.

Основные технические характеристики осциллографов серии TDS 1000B/2000B представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Параметры массовых осциллографов серии TDS1000B/2000B корпорации Tektronix

Модель	Число каналов	Полоса частот	Частота выборки	Экран дисплея
TDS1001B	2	40 МГц	0,5 Гвыб/с	Монохромный
TDS1002B	2	60 МГц	1 Гвыб/с	Монохромный
TDS1012B	2	100 МГц	1 Гвыб/с	Монохромный
TDS2002B	2	60 МГц	1 Гвыб/с	Цветной

Модель	Число каналов	Полоса частот	Частота выборки	Экран дисплея
TDS2004B	4	60 МГц	1 Гвыб/с	Цветной
TDS2012B	3	100 МГц	1 Гвыб/с	Цветной
TDS2014B	4	100 МГц	1 Гвыб/с	Цветной
TDS2022B	2	200 МГц	2 Гвыб/с	Цветной
TDS2024B	4	200 МГц	2 Гвыб/с	Цветной



Рис. 5.2. Внешний вид цифровых запоминающих осциллографов серий TDS 1000B/2000B фирмы Tektronix

Стоимость этих 2–4-канальных приборов в пределах от 1 до 2,5 тысяч долларов. Полоса частот приборов от 40 до 200 МГц и время нарастания до 1,8 нс открывают возможности исследования и отладки огромного числа схем на различных полупроводниковых и иных приборах и микросхемах. Похожие по внешнему виду и возможностям осциллографы TPS1000/2000 имеют входы с гальванической развязкой и воз-

возможность питания от аккумуляторной батареи. Они очень удобны для исследования и тестирования источников электропитания и различных устройств энергетики и промышленной электроники. Приборы имеют возможность проведения курсорных измерений, 11 автоматических измерений и встроенный цифровой частотомер.

На рис. 5.3 показана копия экрана 4-канального 200 МГц осциллографа TDS 2024, представляющая семейство из четырех осциллограмм, иллюстрирующих работу делителя частоты на основе релаксационного генератора. Опытный взгляд улавливает дискретность осциллограмм — разрядность кодирования по вертикали у этих приборов равна 8 бит, т. е. число ступенек в пределах экрана равно 256.

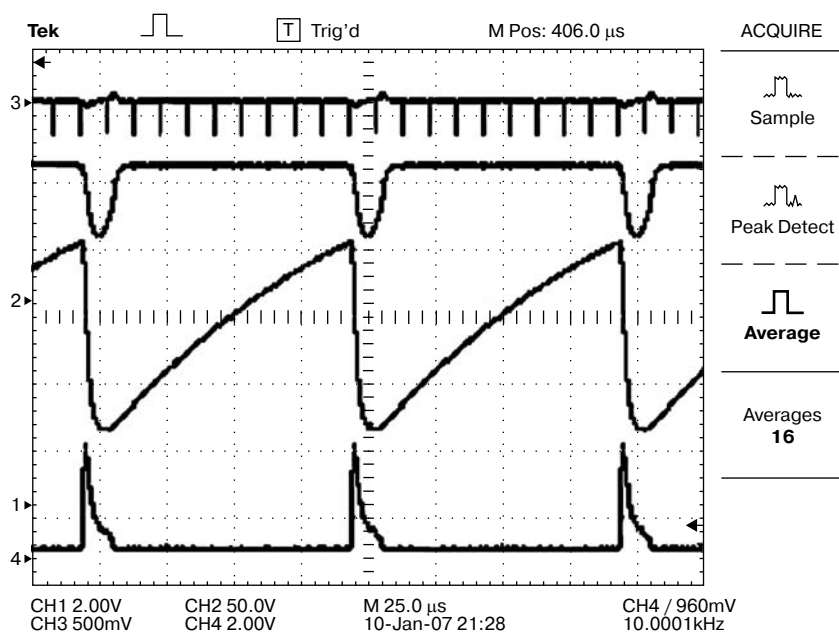


Рис. 5.3. Копия экрана 4-канального 200 МГц осциллографа TDS 2024

Большинство современных цифровых осциллографов реализует быстрое преобразование Фурье (БПФ) — особый алгоритм дискретного преобразования Фурье (ДПФ), позволяющий уменьшить число комплексных умножения до $(N/2)\log_2 N$. Это достигается, если число отсчетов составляет $2k$, где k — целое число. Обычное ДПФ требует N^2 комплексных умножений. Резкое уменьшение времени БПФ позволило реализовать его в цифровых осциллографах и превратить их анализатор спектра для массовых применений. Для повышения разрешающей способности спектрального анализа используется оконное преобразование с окнами различного типа (прямоугольным, Ханнинга, Блэкмана и др.).

На рис. 5.4 показана спектрограмма прямоугольных импульсов, полученная с помощью осциллографа TDS-2024B. Используется окно Ханнинга. Нетрудно заметить, что у данного осциллографа спектрограмма очень напоминает ее классическое изоб-

ражение в виде вертикальных линий с частотами, соответствующими частотам гармоник (см. рис. 2.3). К сожалению, так бывает далеко не всегда — часто линии спектра имеют вид плавных пиков, расположенных на шумовой дорожке.

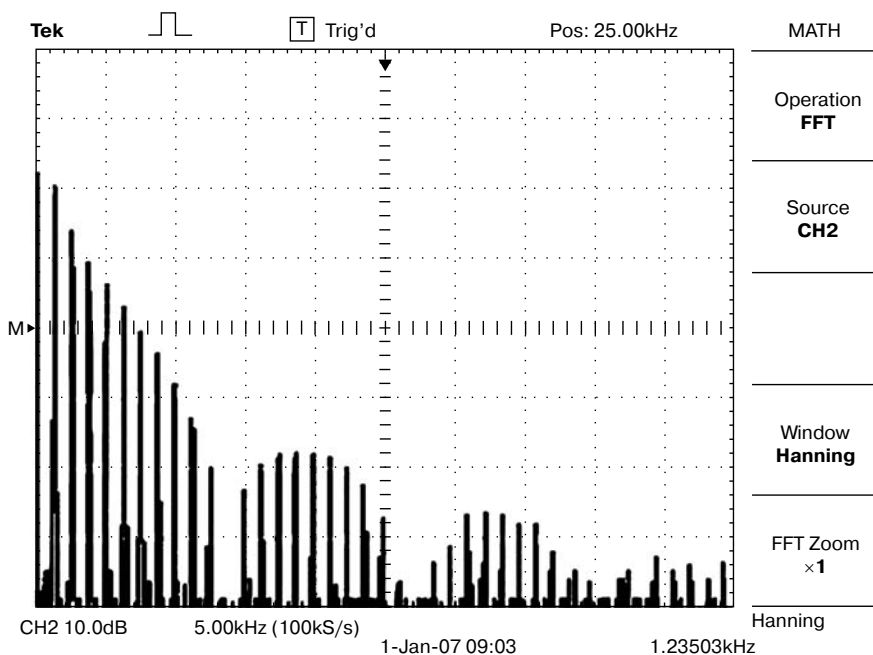


Рис. 5.4. Копия экрана осциллографа TDS 2024 с представлением спектра прямоугольного импульса

Приемлемым ценовым диапазоном характерны и цифровые запоминающие осциллографы серии TDS/DPO 3000 с технологией цифрового фосфора (DPO). Они выпускаются с максимальными частотами исследуемых сигналов от 100 до 500 МГц и частотами дискретизации от 1,25 до 5 ГГц. К сожалению, стоимость старших моделей этих приборов достигает 13–14 тысяч долларов.

Внешний вид осциллографа TDS 3054 из серии TDS 3000 показан на рис. 5.5. На экране осциллографа видна осциллограмма телевизионного сигнала в виде набора сигналов из большого числа строк. Синхроимпульсы при этом сливаются, а вот видеосигналы строк различны и накладываются друг на друга благодаря применению технологии DPO. Часто это позволяет выявить аномалии исследуемого сигнала.

Разумеется, отмеченные выше приборы являются далеко не единственными, но одними из лучших в среднем классе. Прекрасные генераторы сигналов и осциллографы выпускают конкуренты корпорации Tektronix — фирмы Agilent Technologies, LeCroy и др. Однако не стоит приобретать приборы хаотично — это может привести к многочисленным нестыковкам в их совместном использовании с ПК и друг с другом. Рекомендуется приобретать приборы одной известной фирмы.



Рис. 5.5. Внешний вид осциллографа TDS-3000

5.1.4. Лаборатория высшего (HiFi) уровня

Лаборатория высшего уровня (класса), или, как сейчас принято говорить, HiFi или даже Hi End класса, нужна для серьезной профессиональной деятельности. Это исследования в области физики высокоскоростных явлений, разработка современной телекоммуникационной аппаратуры с высокой пропускной способностью и т. д. Наивно полагать, что такую лабораторию можно создать за несколько тысяч долларов — на самом деле даже минимальные затраты будут на пару порядков выше.

Генератор произвольных сигналов и цифровой осциллограф по-прежнему являются основными приборами и для лаборатории высшего уровня. Однако требования к ним куда жестче, чем предъявляемые к приборам лаборатории среднего уровня. И здесь на первом месте снова приборы корпораций Tektronix, Agilent Technologies, ROLDE&SCHWARZ и LeCroy, хотя есть и ряд других фирм, достойно представляющих измерительные приборы высокого класса.

Прежде всего, надо учитывать, что универсальных генераторов сигналов различной формы на диапазон частот до десятков ГГц пока нет. Наиболее интересными в классе серийных универсальных генераторов являются генераторы сигналов произвольной формы серии AWG7000 корпорации Tektronix. Приборы способны генериро-

вать сигналы самой разнообразной формы с частотой повторения до 5,8 ГГц и передавать многоуровневые сигналы со скоростью до 10 Гбит/с. Частота дискретизации у этих приборов достигает 20 ГГц, минимальное время нарастания сигналов 45 пс, разрешение по вертикали 10 бит. Длина оцифрованных сигналов достигает 32 400 000 точек, что позволяет формировать сложнейшие последовательности, применяемые ныне при исследовании и отладке современного коммуникационного оборудования. Идеология приборов и принципы работы с ними те же, что у приборов серии AFG3000.

Выбор осциллографов для современной лаборатории высшего класса весьма широк. Среди аналоговых осциллографов с полосой частот до 1 ГГц на нашем рынке нельзя не отметить особо уникальные приборы японской фирмы Iwatsu. Они под маркой АСК-8104/8064 (полоса частот 1/0,6 ГГц) реализуются фирмой "Эликс" [126]. В приборах используется малоразмерная сканирующая электронно-лучевая трубка на приборе с зарядовой связью (ПЗС) и памятью на 6 осциллограмм, сигнал с которого поступает на плоский жидкостно-кристаллический индикатор. Скорость захвата осциллограмм у этих приборов уникальна — до 1 млн/с, скорость записи достигает 10 дел/нс. Другая серия приборов АСК-7074/7404/7304 (с полосой частот 470/400/300 МГц) выполнена на ультраяркой электронно-лучевой трубке обычной конструкции. Приборы имеют две развертки А и В, развертка В может быть задержанной (лупа времени).

Несмотря на бурное развитие цифровых осциллографов, аналоговые осциллографы все еще имеют некоторые принципиальные преимущества: доведение "живого" сигнала до индикатора без преобразований, высокое разрешение по вертикали (отсутствие эффектов квантования), высокая скорость захвата осциллограмм и др.

Однако основой HiFi или Hi End лаборатории в наше время является все же широкополосный и скоростной цифровой запоминающий осциллограф. У цифровых осциллографов высшего класса специалисты ценят не только полосу частот исследуемых сигналов, но и способность осциллографов хранить большие куски оцифрованных сигналов и возможности синхронизации и запуска по различным событиям. Немаловажное значение имеет и способность осциллографов представлять сигналы в специальном виде, например глазковых диаграмм, гистограмм, осциллограмм с различной градацией яркости и цвета и т. д. Само собой разумеется, что должно быть обеспечено подключение к ПК, как правило, через скоростной порт USB. Оно вполне естественно у цифровых осциллографов и, как правило, отсутствует у аналоговых осциллографов.

В таблице 5.2 представлены основные параметры современных осциллографов корпорации Tektronix и указан рекомендуемый для совместной работы с ними тип генератора сигналов.

Таблица 5.2. Основные параметры осциллографов корпорации Tektronix и рекомендуемые генераторы для совместного применения с ними

Тип осциллографа	Число каналов	Дискретизация, Гвыб/с	Верхняя частота, МГц	Длина записи, Мбайт	Рекоменд. генератор
TDS1000/B	2	0,5; 1	40; 60; 100	2,5 Кбайт	AFG3000
TDS2000/B	2,4	1; 2	60; 100; 200	2,5 Кбайт	AFG3000

Тип осциллографа	Число каналов	Дискретизация, Гвыб/с	Верхняя частота, МГц	Длина записи, Мбайт	Рекоменд. генератор
TDS3000B	2,4	1,25; 2,5; 5	100, 200,300, 400, 500	10 Кбайт	AFG3000 AWG5000
DPO4000	2, 4	2,5; 5	350; 500; 1000	10	AFG3000 AWG5000
MSO4000	2+16d, 4+16d	2,5; 5	350; 500; 1000	10	AWG5000 AWG7000
TDS5000	4	5	350; 500; 1000	8	AFG3000 AWG7000
DPO7000	4	10; 20; 40	0,5; 1; 2.5 ГГц	40/200	AWG5000 AWG7000
DPO70000	4	25	4; 6; 8 ГГц	10/100	AWG7000
DSA70000	4	25	4; 6; 8 ГГц	20/100	AWG7000

Из сравнительно недорогих и самых современных цифровых запоминающих осциллографов фирмы Tektronix можно отметить модели серии DPO-4000, имеющих вполне умеренные габариты и массу и, в тоже время, большой экран дисплея. Они выпускаются с полосой частот 0,35, 0,5 и 1 ГГц. Лишь младшая модель DPO-4032 двухканальная, остальные четырехканальные. Приборы этой серии реализуют технологию цифрового фосфора, имитирующую свойство изменения яркости осциллограмм. Специальное фирменное устройство WaveInspector открывает возможность просмотра и анализа малого участка осциллограмм, общая длина которых доходит до 10 млн точек в каждом канале. Приборы имеют 25 автоматических измерений, расширенные средства синхронизации, слот USB для сменных карт флэш-памяти и все необходимые средства для работы совместно с ПК.

Новейшая серия осциллографов MSO4000 — это осциллографы смешанных сигналов (рис. 5.6). Они имеют все возможности приборов серии DPO4000, поскольку выполнены на их основе, и сочетают это с возможностями 16-канального логического анализатора. Естественно, что это заметно расширяет области применения этих приборов. Осциллограммы, видимые на экране осциллографа (рис. 5.5), иллюстрируют его способности в представлении множества сигналов различного типа.

Как логический анализатор осциллограф MSO4000 имеет два режима сбора данных. В первом режиме 10 млн точек захватываются с частотой дискретизации 0,5 ГГц, что дает временное разрешение в 2 нс. Оно достаточно для тестирования большинства цифровых устройств, кроме особо скоростных. Второй режим основан на фирменной технологии MagniVu, ранее примененной в логических анализаторах компании Tektronix. В этом случае 10 000 точек захватываются с частотой дискретизации 16,5 ГГц, что соответствует временному разрешению в 60,6 пс. Это позволяет тестировать даже высокоскоростные цифровые и логические устройства и системы.

В каждом из режимов осуществляются различные виды синхронизации, в том числе по заданному событию. Сигналы можно просматривать в любое время, как в динамическом, так и статическом режимах. Осциллографы серии MSO можно использовать

для проверки работы с логическими сигналами от генераторов AWG5000 и генераторов паттернов логических сигналов.

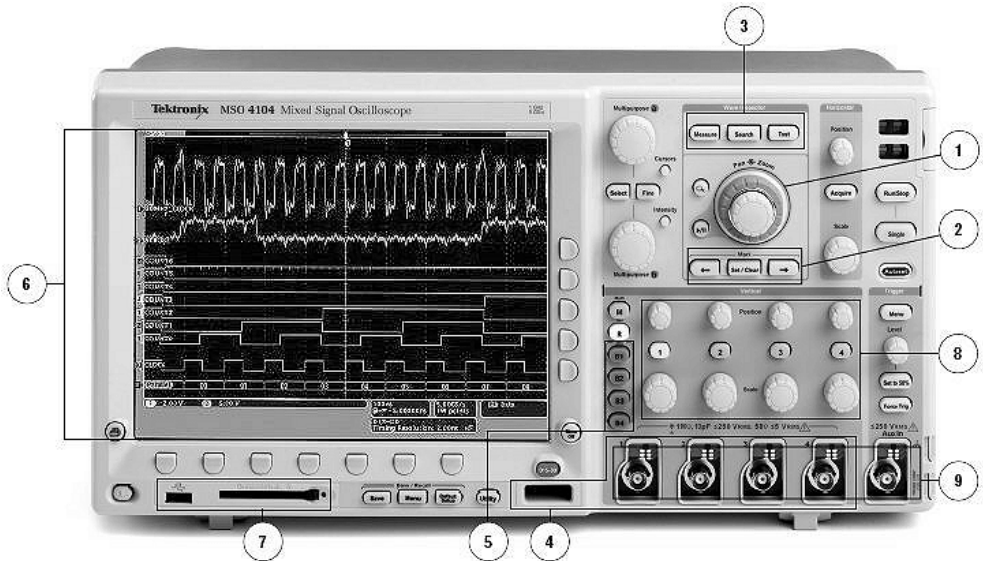


Рис. 5.6. Внешний вид осциллографов смешанных сигналов MSO4000 фирмы Tektronix (1 — универсальная поворотная ручка, 2 — кнопки управления направлением, 3 — блок WaveInspector, 4 — порт USB, 5 — кнопки дополнительных опций, ssb — экран дисплея, 7 — порт логического анализатора, 8 — органы управления каналами вертикального отклонения, 9 — разъемы каналов вертикального отклонения, синхронизации и внешнего запуска)

Осциллографы серии TDS5000B (рис. 5.7) реализованы на основе платформы встроенного в них персонального компьютера со своим жестким диском и операционной системой Windows. На жесткий диск могут устанавливаться различные дополнительные программы, например, системы компьютерной математики Excel, Mathcad или MATLAB. Хотя эти весьма серьезные приборы выпускаются давно и их выпуск сокращается, по некоторым своим характеристикам они заметно превосходят приборы серий TDS1000B/2000B и даже DPO4000.

В состав серии входит 5 приборов, основные параметры которых приведены в таблице 5.3. В настоящее время в серийном производстве остались приборы TDS5034B.

Таблица 5.3. Параметры цифровых осциллографов серии TDS5000 корпорации Tektronix

Модель	Число каналов	Полоса пропускания	Максимальная частота дискретизации в реальном масштабе времени
TDS5032B	2	350 МГц	5 Гвыб/с
TDS5034B	4	350 МГц	5 Гвыб/с
TDS5052B	2	500 МГц	5 Гвыб/с

Модель	Число каналов	Полоса пропускания	Максимальная частота дискретизации в реальном масштабе времени
TDS5054B	4	500 МГц	5 Гвыб/с
TDS5104B	4	1 ГГц	5 Гвыб/с



Рис. 5.7. Внешний вид осциллографов с цифровым люминофором серии Tektronix TDS5000B

Масштаб по вертикали у всех приборов от 1 мВ/дел до 10 В/дел на высокоомном входе и до 1 В/дел на 50-омном входе, по горизонтали от 200 пс/дел до 40 с/дел. Приборы обеспечивают 13 видов синхронизации и 53 вида автоматических измерений (амплитудных, частотно-временных, статистических и др.). Частота дискретизации в 5 ГГц обеспечивает не менее 5 отсчетов на минимальной длительности перепадов или

фронтов наблюдаемых импульсных сигналов. Цветной жидкостно-кристаллический дисплей имеет размер по диагонали 26,4 мм и разрешение 640×480 точек.

Главное, что отличает осциллографы серии TDS5000 от приборов более ранних серий, так это построение их на основе открытой платформы персонального компьютера с операционной системой Microsoft Windows 2000 Professional или Windows ME. Это бросается в глаза уже с первого взгляда на экран осциллографа (см. рис. 5.8), сверху которого расположено меню, выполненное в лучших традициях этих операционных систем и управляемое обычной компьютерной мышью или клавиатурой. Возможно также управление с использованием сенсорных свойств экрана.

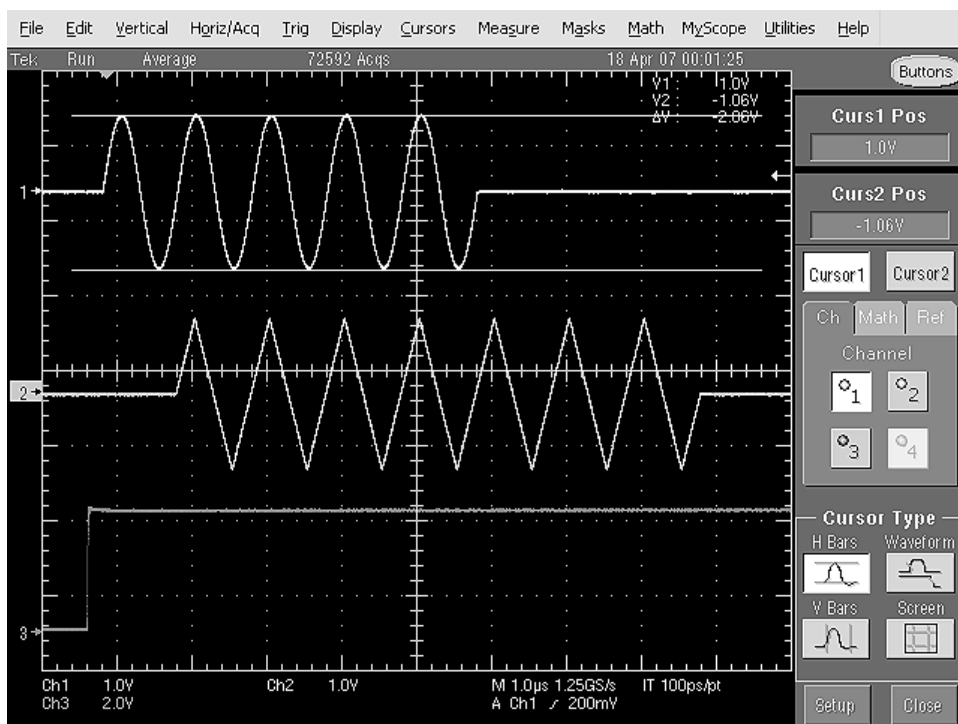


Рис. 5.8. Вид экрана осциллографа TDS5000 (показаны осциллограммы с двух основных выходов генератора AFG3152 и выхода ТТЛ)

Заложенная в TDS5000 концепция реализуется в последующих сериях осциллографов 6000, 7000, 70000 и др. Цифровые осциллографы корпорации Tektronix DPO7054/7104/7254 (рис. 5.9) с частотами исследуемых сигналов 0,3/1/2,5 ГГц имеет частоту дискретизации на всех каналах до 10, а на одном канале даже до 40 Гвыб/с, длина записи достигает 400 млн точек. Уникальные средства синхронизации Pinpoint обеспечивают практические неограниченные возможности запуска по любым событиям — более 1 400 вариантов синхронизации. Число автоматических измерений достигает 50, захват осциллограмм возможен со скоростью 250 000 осц/с.

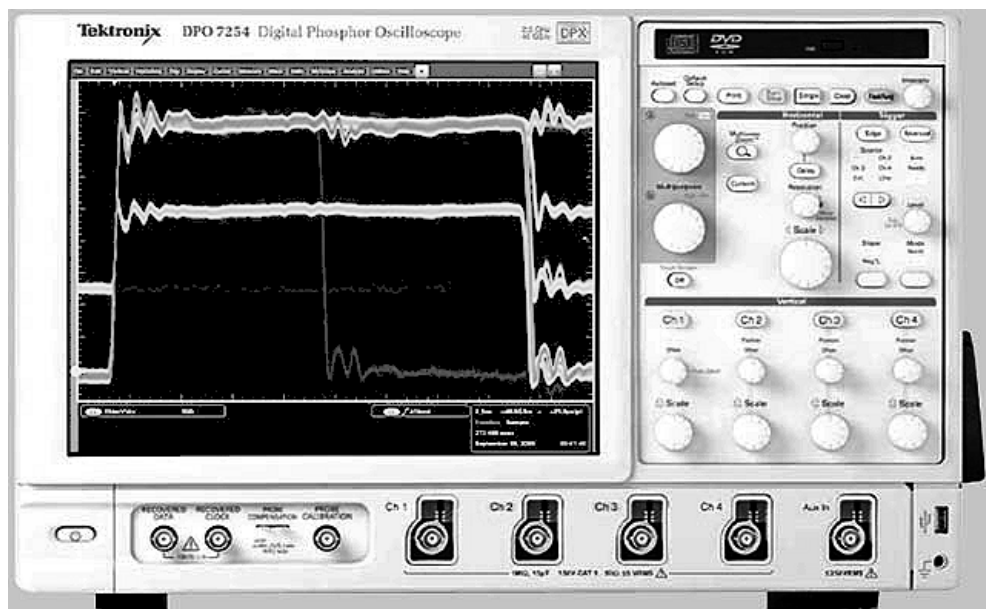


Рис. 5.9. Внешний вид осциллографа DPO7254 со стороны передней панели

Осциллограммы, изображенные на экране рис. 5.9, иллюстрируют технику применения цифрового фосфора. При этом в центре экрана виден глюк — задний фронт случайного импульса. Рис. 5.10 детально представляет экран осциллографа при отображении выходных сигналов разной формы от генератора AFG3152. Кроме осциллограмм представлена панель с результатами автоматических измерений и панель установки выбранных режимов измерений.

Новейшая серия четырехканальных широкополосных осциллографов Tektronix DPO-70000 имеет существенно расширенный диапазон исследуемых частот — до 4, 6, 8, 13,5 и 20 ГГц. Чувствительность по вертикали от 1 мВ/дел до 10 В/дел, развертка по горизонтали от 20 пс/дел до 1000 с/дел. Приборы имеют джиттер (временную нестабильность фронтов импульсов) менее 1 пс, а минимум временного джиттера 425 фс (указаны среднеквадратичные значения — RMS). Осциллографы имеют огромный 30 см жидкокристаллический цветной дисплей с разрешением XGA. Фактически их основой является персональный компьютер с операционной системой Windows XP.

Диапазон частот широкополосных цифровых осциллографов реального времени доходит до 10–20 ГГц, а стробоскопических до 70–100 ГГц (приборы TDS8000В корпорации Tektronix и WaveExpert и SDA 100 G фирмы LeCroy). Обзор приборов этого класса дан в [6, 7]. Такие уникальные приборы используются для разработки сверхскоростных схем для микропроцессоров, уникального физического оборудования, исследования и тестирования телекоммуникационных скоростных устройств, современных интерфейсов связи компьютеров с периферийным оборудованием и др. устройств.

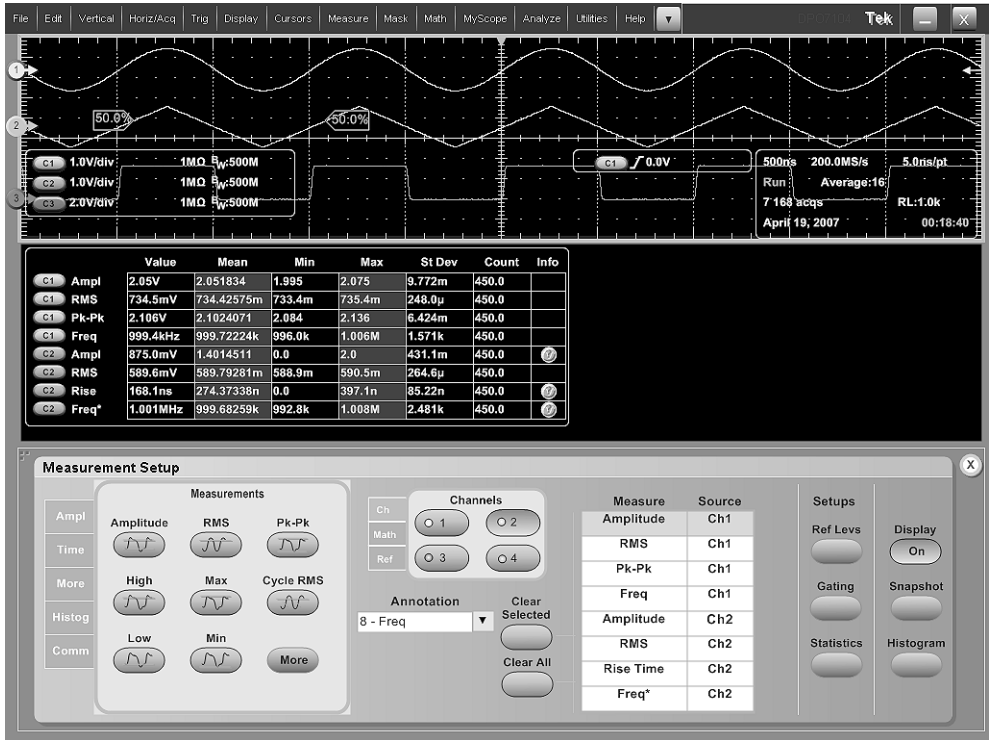


Рис. 5.10. Экран осциллографа DPO7254

В лаборатории класса Hi End может оказаться весьма полезным и *анализатор спектра* высокого класса, хотя функции анализа спектра есть во всех современных цифровых осциллографах. Наиболее полное развитие методы спектрального анализа получили в современных *анализаторах спектра реального времени* и *анализаторах сигналов*. Корпорация Tektronix, к примеру, выпускает ряд настольных анализаторов спектра реального времени, построенных на основе встроенного ПК. Например, это анализаторы спектра реального времени — серия RSA2200, RSA3408A и новейшая RSA6100A (рис. 5.11). Полоса обзора у них до 3 МГц (модель RSA2203A) и 8 ГГц (RSA2208A), объем памяти на каждый канал 512 Мбайт. Ширина полосы обзора у RSA3408A от 0 Гц до 40 МГц.

Приборы имеют высокую стабильность частоты и малый уровень шумов. Они позволяют реализовать множество видов спектрального анализа, в том числе трехмерного "спектральная плотность-частота-время" и динамического. Возможность получения спектра нестационарного сигнала во временной области (называемого спектрограммами — рис. 5.12) особенно привлекательна, поскольку позволяет выявлять многие аномалии или особенности сигналов, которые невозможно обнаружить с помощью обычных осциллограмм.

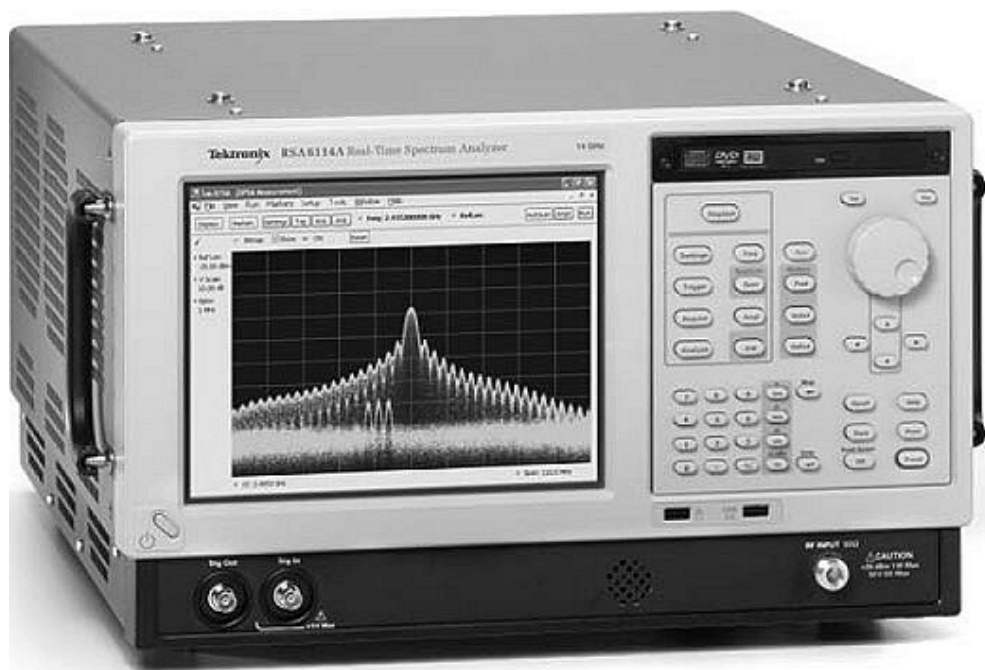


Рис. 5.11. Внешний вид анализатора спектра реального времени

Приборы нового класса — *анализаторы сигналов и источников сигналов* предназначены для анализа сложных сигналов со многими типами модуляции в современном коммуникационном оборудовании. Обычно они объединяют несколько приборов для анализа фазовых шумов сигналов и быстрого анализа их спектров сигнала различными методами. Пожалуй, лидерство в их разработке и выпуске на рынок принадлежит корпорации Agilent Technologies, как и в выпуске осциллографов смешанных сигналов, которые предназначены для одновременного получения спектрограмм сигналов и диаграмм логического состояния цифровых устройств. 4-канальные анализаторы телекоммуникационных сигналов корпорации Tektronix DSA-70404/70604/70804 охватывают диапазон частот анализируемых сигналов 4–6–8 ГГц.

Уникальные анализаторы источников сигналов FSUP8/26/50 с диапазоном частот от 20 Гц до 8, 26,5 и 50 ГГц (с внешним смесителем до 110 ГГц) выпускает фирма Rohde&Schwarz. Приборы позволяют выделять мельчайшие детали спектра с разрешением, достигающим до 1 Гц. Минимальный уровень сигнала достигает -140 дБ.

Практически все современные измерительные приборы имеют средства связи с персональными компьютерами и программы для ввода в компьютер значений измеряемых параметров, осциллограмм и спектрограмм. Они могут обрабатываться с помощью систем компьютерной математики, что открывает огромные возможности в теоретическом анализе и экспериментальном исследовании сложных процессов.

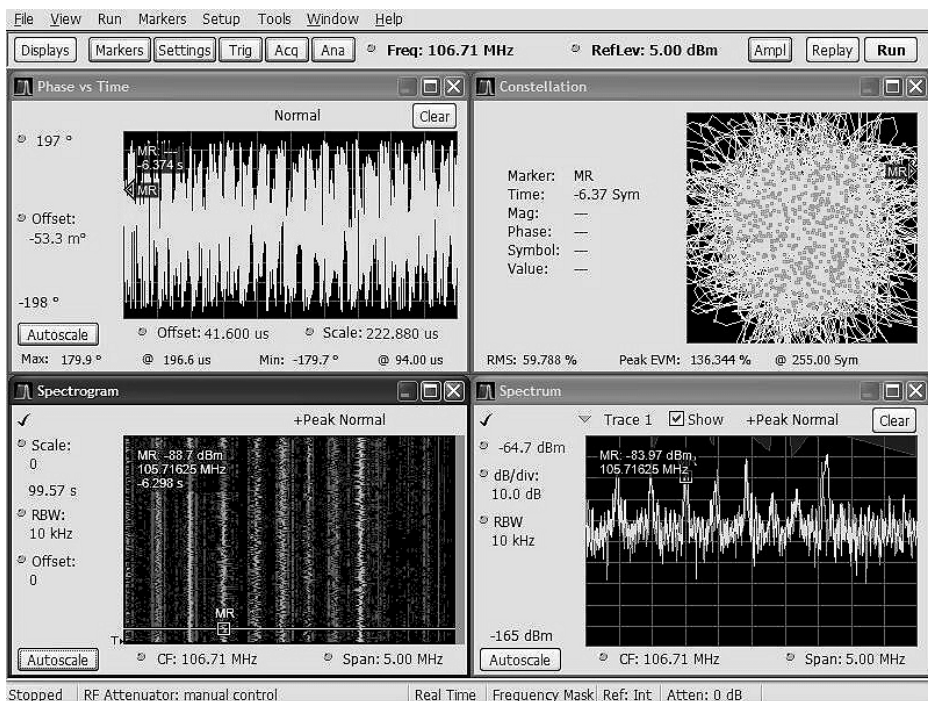


Рис. 5.12. Вид экрана анализатора спектра реального времени RSA6100A с различными представлениями сигнала

5.2. Контроль параметров генераторов сигналов

5.2.1. Осциллографический контроль формы сигналов

Осциллографический контроль формы сигналов генераторов является основным средством быстрой оценки их работоспособности. В случае синусоидальных сигналов осциллографический контроль позволяет в первом приближении оценить чистоту сигнала, диапазон изменения его частоты, умеренный уровень сигнала и степень искажения сигнала при повышенном его уровне. В случае импульсных сигналов осциллографический контроль позволяет детально исследовать форму импульсов и определить их важнейшие параметры.

Центральное место в решении задачи осциллографического контроля сигналов занимает выбор наиболее подходящего типа осциллографа. В случае синусоидальных сигналов полоса частот осциллографа должна превышать максимальную частоту сигнала во столько раз, сколько гармоник содержится в спектре сигнала. В большинстве случаев достаточно иметь полосу частот осциллографа в 3–5 раз выше максимальной

частоты сигнала. При этом погрешность оценки амплитуды сигнала и времени его нарастания лежит в пределах от 20 до 5% и сильно зависит от формы АЧХ осциллографа.

Для осциллографов, рассчитанных на исследование цифровых сигналов, существует следующее эмпирическое правило: полоса частот осциллографа должна не менее чем в 5 раз превышать тактовую частоту исследуемого цифрового устройства.

Следует учитывать, что умеренную стоимость имеют только осциллографы с полосой частот до 200–300 МГц. Увеличение полосы частот свыше этого предела ведет к далеко не пропорциональному росту стоимости осциллографа.

Пусть, к примеру, надо исследовать сигналы генераторов произвольных сигналов серии AFG3000. Максимальная частота синусоидальных сигналов у моделей AFG3151/3152 составляет 240 МГц. Это значит, что желательно применение осциллографов серий DPO/MSO4000 или TDS5000 с полосой исследуемых частот до 1 ГГц.

На рис. 5.13 показаны осциллограммы сигналов меандра с частотой около 60 МГц и синусоидального сигнала с частотой 240 МГц с выходов двухканального генератора AFG3152, снятые с помощью осциллографа серии TDS5104 с полосой частот от 0 до 1 ГГц.

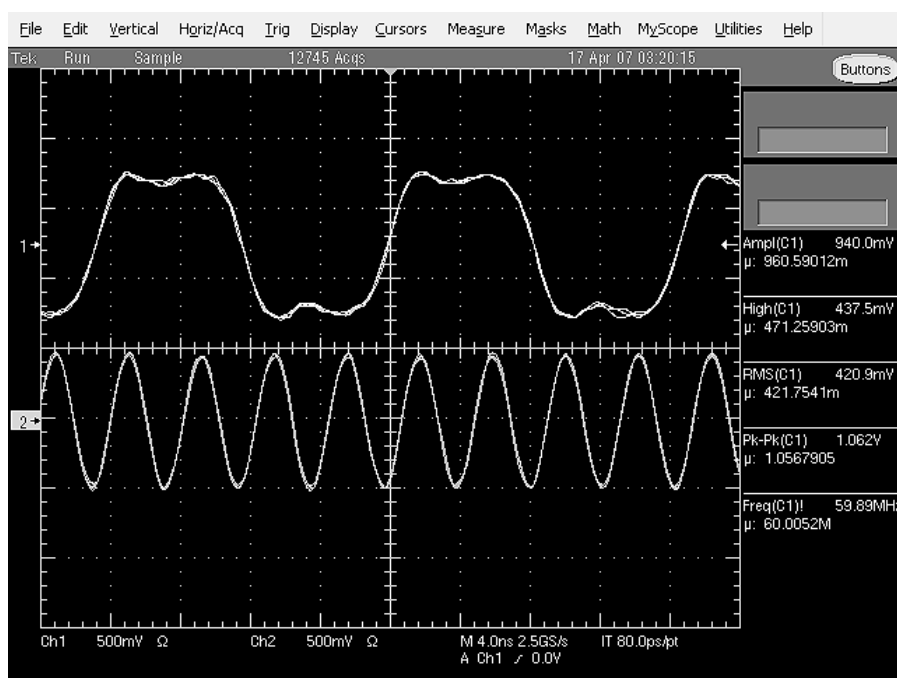


Рис. 5.13. Осциллограммы меандра с частотой около 60 МГц и синусоидального сигнала с частотой 240 МГц с выходов двухканального генератора AFG3152

К синусоидальному сигналу с максимально возможной частотой претензий нет — на глаз его искажения не заметны. А вот меандр даже на частоте 60 МГц (вдвое меньшей, чем допустимо) выглядит очень далеким от идеального. Ясно, что на предельной

частоте 120 МГц он просто вырождается в слегка искаженную синусоиду. Этот факт уже является важным следствием осциллографического контроля формы сигналов данного генератора (да и других генераторов).

На рис. 5.7 были показаны осциллограммы сигналов в виде пачек синусоиды и треугольных импульсов разной длительности (период 1 мкс), но далекой от предельной. В этом случае форма сигнала очень близка к идеальной.

5.2.2. Контроль и измерение амплитудных параметров генераторов

С помощью современного цифрового осциллографа можно выполнить контроль и измерения временных параметров сигналов генератора. Это возможно тремя способами:

- непосредственный контроль с использованием масштабной сетки;
- курсорные измерения с использованием горизонтальных курсоров;
- автоматическое измерение параметров.

Каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки. Непосредственный контроль с использованием масштабной сетки наиболее прост, но имеет невысокую точность. У обычных осциллографов считается, что его погрешность имеет значения около 5%, что связано с эффектами кривизны поверхности экрана электронно-лучевой трубки и явлением параллакса из-за некоторой удаленности плоскости сетки от плоскости изображения. Но все современные цифровые осциллографы имеют абсолютно плоский ЖКИ, и осциллограммы и сетки строятся в одной плоскости. К тому же многие ЖКИ имеют большой экран, так что, тщательно присмотревшись к осциллограммам, можно оценить уровни ее точек с погрешностью примерно до 2,5–3%.

Курсорные измерения не требуют тщательности просмотра осциллограмм. Для них не обязателен и вывод масштабной сетки. Все, что нужно выполнить для измерения, это вывести курсоры и установить их в нужные места универсально поворотной ручкой осциллографа. Например, на рис. 5.7 показан вывод двух горизонтальных курсоров и установка их на вершины синусоиды. Положения курсоров по уровню выводятся в окне осциллограмм и позволяют оценить положения пиков и двойную амплитуду синусоидального сигнала. Курсорные измерения особенно удобны, когда надо оценить уровень некоторой произвольной точки осциллограммы.

Осциллографический контроль уровня сигналов генераторов, разумеется, не является единственным. В области низких частот имеется множество выпускаемых серийно вольтметров и милливольтметров, измеряющих амплитуду или действующее значение переменного напряжения с высокой точностью — есть цифровые приборы с погрешностью измерения порядка 0,01%. Некоторые из приборов измеряют истинное среднеквадратическое значение сигналов (True RMS), что позволяет оценивать амплитуду прямоугольных и треугольных сигналов (при условии, однако, осциллографического контроля их формы).

5.2.3. Контроль временных параметров сигналов генераторов

Контроль временных параметров сигналов генераторов выполняется точно так же, как и контроль амплитудных параметров. При этом используется горизонтальная шкала времени осциллограмм. В случае курсорных измерений используются вертикальные курсоры. Измеряются следующие основные параметры: период, длительность импульсов, коэффициент заполнения и времена нарастания и спада импульсов.

Рис. 5.14 иллюстрирует измерение параметров синусоидального сигнала с использованием как вертикальных, так и горизонтальных курсоров. Таким образом измеряются период и частота синусоидального напряжения, уровни его пиков и двойная амплитуда. Все результаты измерений выводятся справа от области осциллограмм.

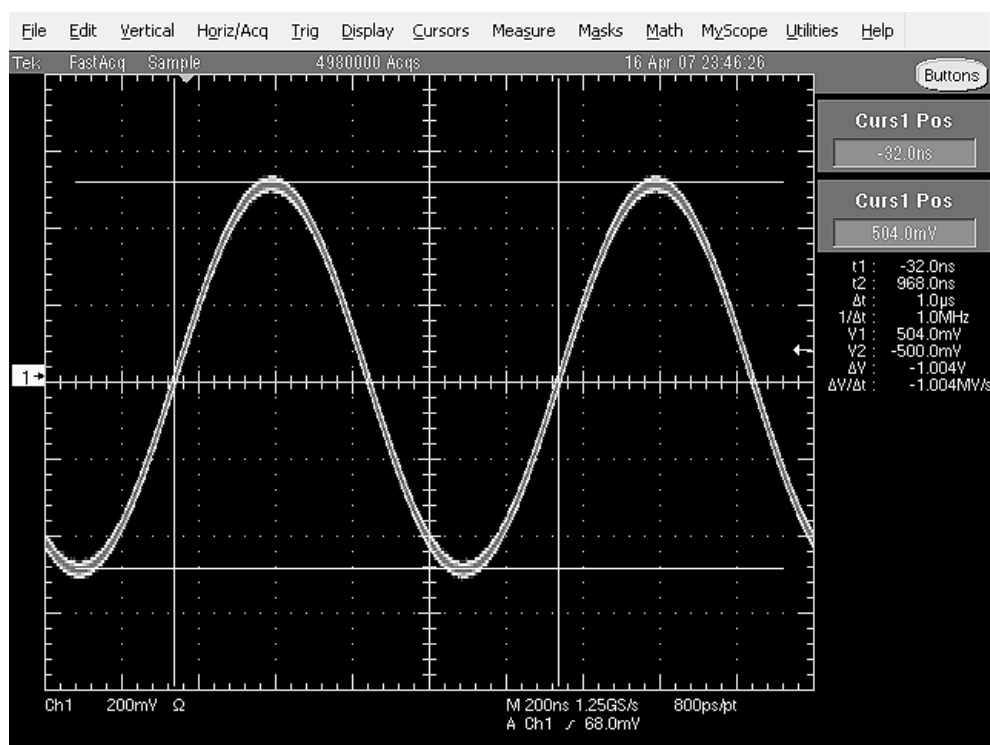


Рис. 5.14. Пример курсорных измерений с применением вертикальных и горизонтальных курсоров

Возможен также неосциллографический контроль временных параметров сигналов. Например, контроль частоты и периода сигналов удобно проводить, используя цифровые частотомеры, которых выпускается и предлагается на рынке великое множество. Некоторые из них могут измерять и длительность импульсов — но не очень коротких.

5.2.4. Проведение автоматических измерений

Измерения осциллографом в *режиме автоматических вычислений* кажутся наиболее удобными и практичными. Они фактически объединяют осциллографический контроль сигналов с современными цифровыми методами измерений. Типовая погрешность измерений при этом составляет 1–2%, а иногда (особенно для временных параметров) и намного меньше. Но это справедливо только в случае выполнения вполне определенных вычислений и определенных для каждого вычисления условий, например, размера осциллограмм, числа периодов сигнала в пределах экрана и т. д. Осциллографы серии TDS5000 и DPO7000 имеют 53 вида автоматических измерений: амплитудные, временные, статистические и др.

Очень удобно автоматические измерения выполняются осциллографами серии DPO7000/70000. При вызове режима автоматических измерений из меню Measure внизу экрана появляется панель Measurement Setup (рис. 5.15), в которой в простой и наглядной форме можно задать нужные измерения по любому из каналов осциллографа. В области Measurement этой панели можно выбрать одну из 9 групп автоматических измерений и в каждой группе назначить любое из доступных измерений.

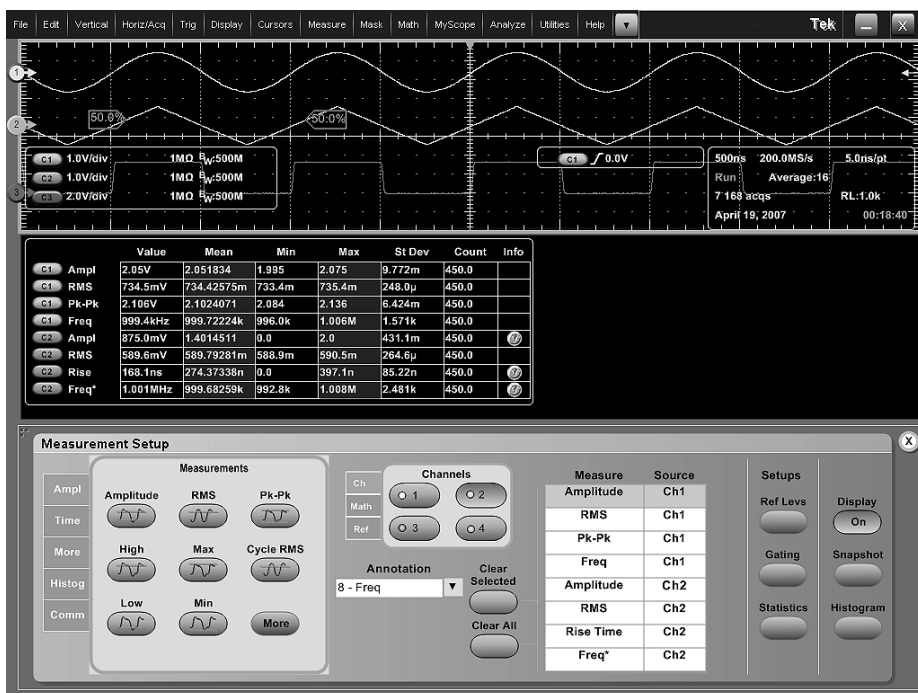


Рис. 5.15. Установка автоматических измерений у осциллографа DPO7000

Все результаты измерений появляются в окне под осциллограммами. Поскольку все реальные сигналы имеют нестабильности и шумы, то одновременно с автомати-

ческими измерениями выполняется их статистический анализ, данные которого (среднее, максимальное, минимальное значения, среднеквадратическое отклонение и др.) также выводятся. Закрыв панель установки измерений, можно получить изображение осциллограмм на большей площади экрана (рис. 5.16).

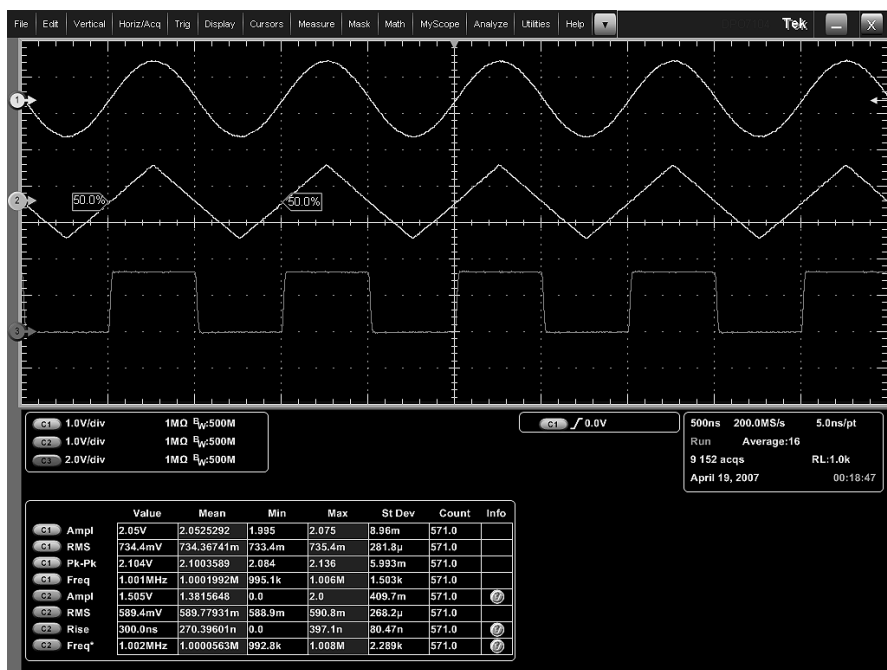


Рис. 5.16. Осциллограммы и результаты автоматических вычислений на экране осциллографа DPO7000

5.2.5. Контроль времени нарастания импульсов генератора

Контроль времени нарастания импульсов генераторов является одной из важнейших задач их проверки. И здесь проще всего воспользоваться подходящим осциллографом. Однако основным параметром осциллографа в этом случае является его собственное время нарастания. Желательно, чтобы оно было в 3–5 раз меньше, чем время нарастания (и спада) импульсов проверяемого генератора. Время нарастания импульсов обычно оценивается на уровнях 10 и 90% от амплитуды, но иногда (для осциллографов с полосой более 1 ГГц) на уровнях 20 и 80%.

За исключением генераторов импульсов пикосекундного диапазона для остальных генераторов в принципе выбор подходящего осциллографа особых трудностей (не считая затрат на приобретение или аренду осциллографа) не вызывает. Можно руководствоваться данными таблицы 5.2.

Для автоматического измерения времени нарастания (и спада) надо добиться четкого отображения на экране осциллографа нужного перепада импульса: положительного для измерения времени нарастания (переднего фронта) или отрицательного для измерения времени спада (заднего фронта). Пример измерения времени нарастания импульсов от генератора AFG3152 с помощью осциллографа TDS5104B показан на рис. 5.17.

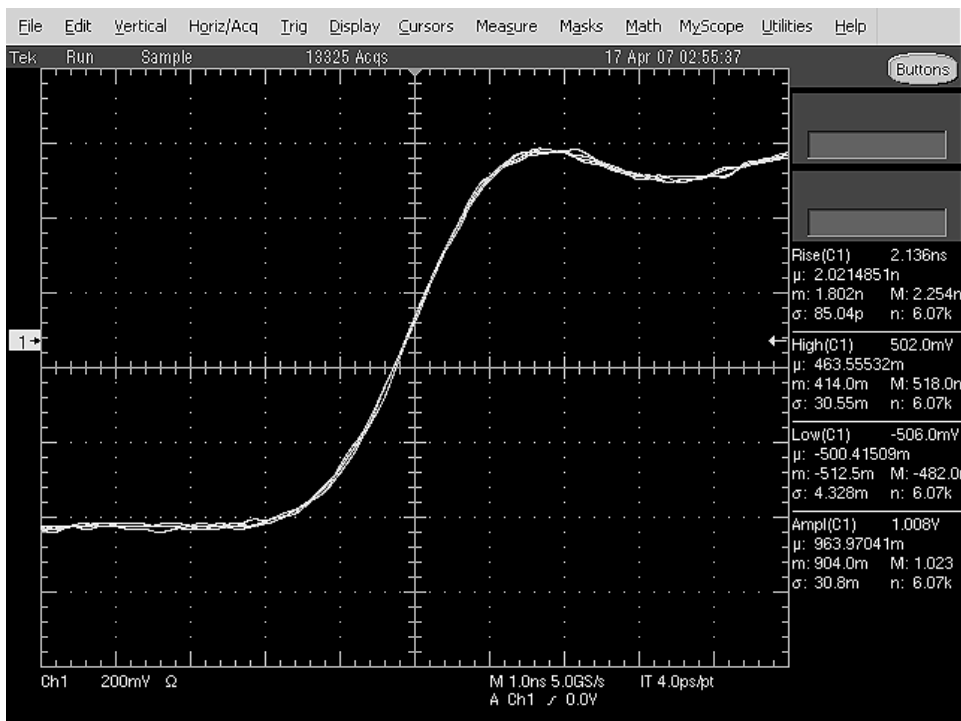


Рис. 5.17. Пример автоматического измерения времени нарастания импульса с помощью осциллографа TDS5104B

При проведении курсорных измерений рекомендуется вначале измерить амплитудные параметры перепада (его минимальный и максимальный уровни), а затем установить вертикальные курсоры на нужные уровни, например 0,1 и 0,9 от амплитуды перепада. Время нарастания (или спада) оценивается как разность временных положений курсоров.

5.2.6. Контроль спектра сигналов с помощью осциллографа

Спектр сигналов, особенно импульсных, имеет важное значение для оценки качества сигналов и их применимости в реальных технических системах и устройствах. Особен-

но это относится к системам частотного разделения каналов и ко многим традиционным радиотехническим устройствам, например радиоприемникам и передатчикам.

Как уже отмечалось, спектральный анализ возможен как с помощью цифровых осциллографов, так и специальных анализаторов спектров. Последние имеют более высокое разрешение и большую точность спектрального анализа, но они обычно стоят заметно выше, чем осциллографы.

Анализатор спектра цифровых осциллографов программный, т. е. он выполняет быстрое оконное преобразование Фурье по встроенной в его ПЗУ микропрограмме. Это не требует аппаратных затрат на фильтры, которые используются в специальных анализаторах спектра. Спектральный анализ с помощью осциллографов имеет невысокое разрешение и пригоден для спектрального анализа, в основном, видеоимпульсов. К ним относятся, в частности, пачки синусоидальных сигналов, прямоугольные, треугольные, пилообразные и прочие импульсы.

Спектральный анализ периодических сигналов стандартной формы уже рассматривался, например, в случае на рис. 5.4, на котором представлен спектр прямоугольных импульсов, полученный с помощью массового цифрового осциллографа TDS 2024В. Осциллограф DPO7000 позволяет строить спектр выделенной части сигнала, что в ряде случаев представляет значительно больший интерес, чем спектр всего видимого на экране сигнала. Рис. 5.18 показывает получение спектра пачки синусоидальных колебаний от генератора AFG3152, выделенной вертикальными маркерами. Внизу экрана показана панель настройки спектрального анализа — выбора канала, вида анализа, окна и т. д.

Обратите внимание на то, что ширину пиков можно менять выбором параметра Resolution BW (RBW), а общую полосу обзора изменять изменением центральной частоты Center Frequency и полосы частот обзора Frequency Span. При заданных на рис. 5.18 установках общая полоса обзора устанавливается от 0 до 10 МГц.

Нетрудно заметить, что спектр представлен одним спектральным пиком, что свидетельствует о синусоидальном характере колебаний пачки внутри выделенного фрагмента сигнала. А на рис. 5.19 показан спектр после изменения формы колебаний внутри пачки с синусоидальной на прямоугольную. Как и следовало ожидать, спектр сильно изменился — наряду с основным пиком, соответствующим первой гармонике, появился ряд убывающих по амплитуде пиков, соответствующих второй, третьей и т. д. гармоникам.

Определенные трудности вызывает анализ спектров с помощью цифровых осциллографов для модулированных сигналов. Так спектр АМ-сигналов состоит из линии несущей и двух боковых полос (при модуляции синусоидальным сигналом двух линий, отстоящих от несущей на расстояние, равное частоте модулирующего сигнала). Например, если синусоидальный сигнал в 1 МГц модулируется синусоидальным сигналом в 1 кГц, то линия несущей будет на частоте 1 000 кГц, а боковые линии на частотах 999 и 1 001 кГц. Разделение их анализатором спектра без узкополосного фильтра достаточно сложно.

Даже такие мощные осциллографы, как DPO7000 с трудом справляются с задачей четкого получения спектра АМ-сигналов. Рис. 5.20 показывает случай, где этот мощ-

ный цифровой осциллограф справился с построением спектра АМ-сигнала, но лишь благодаря тому, что несущая частота выбрана не очень высокой.

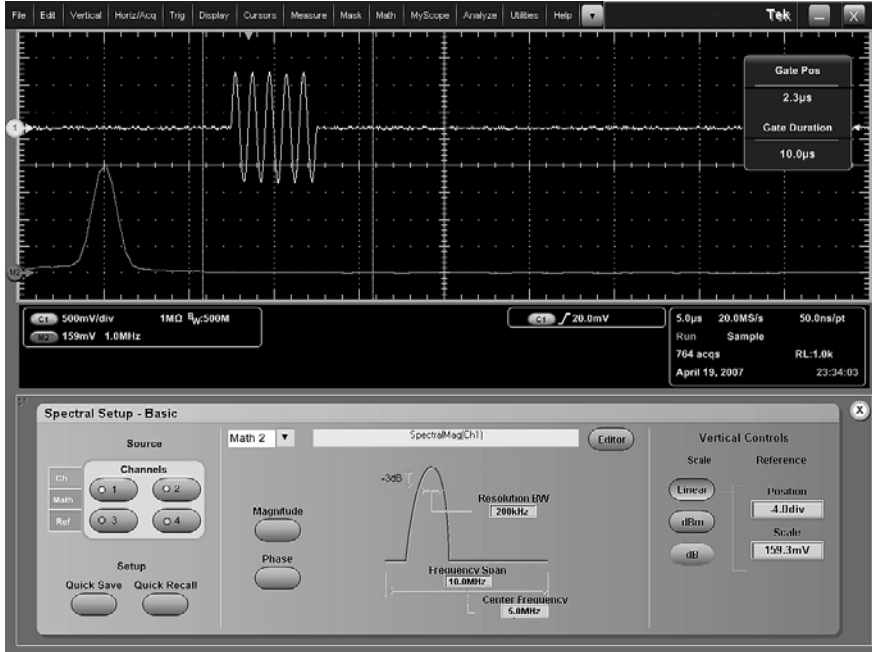


Рис. 5.18. Пример спектрального анализа выделенной пачки синусоидальных колебаний

Впрочем, если воспользоваться максимальным размером памяти современных цифровых осциллографов ведущих фирм и смириться с большим временем анализа, то можно получить вполне качественные спектры АМ-сигналов с частотами несущей порядка 100 МГц и частотой модуляции 1 кГц.

Измерив амплитуду несущей и одной из боковых составляющих спектра, нетрудно оценить коэффициент модуляции АМ синусоидального сигнала. Однако тут надо учитывать, что обычно строится спектр не напряжения, а мощности сигнала. Поэтому для вычисления коэффициента модуляции надо использовать следующее выражение:

$$K_{AM} = 2 \cdot 10^{(P_1 - P_2) / 20}, \quad (5.1)$$

где P_1 — мощность несущей, P_2 — мощность боковой составляющей.

5.2.7. Анализ спектра сигналов генераторов анализатором спектра реального времени

Гораздо большие возможности в получении спектров представляют специально предназначенные для этого приборы — анализаторы спектра [120]. Некоторые из них име-

ют аппаратно реализованные фильтры с достаточно узкой полосой частот, что позволяет получать достаточно острые пики на месте спектральных линий. Но чаще наряду с ними используются и программные фильтры — окна. Для получения широкого диапазона частот используется гетеродинный принцип преобразования полосы анализируемого сигнала в полосу промежуточных частот.

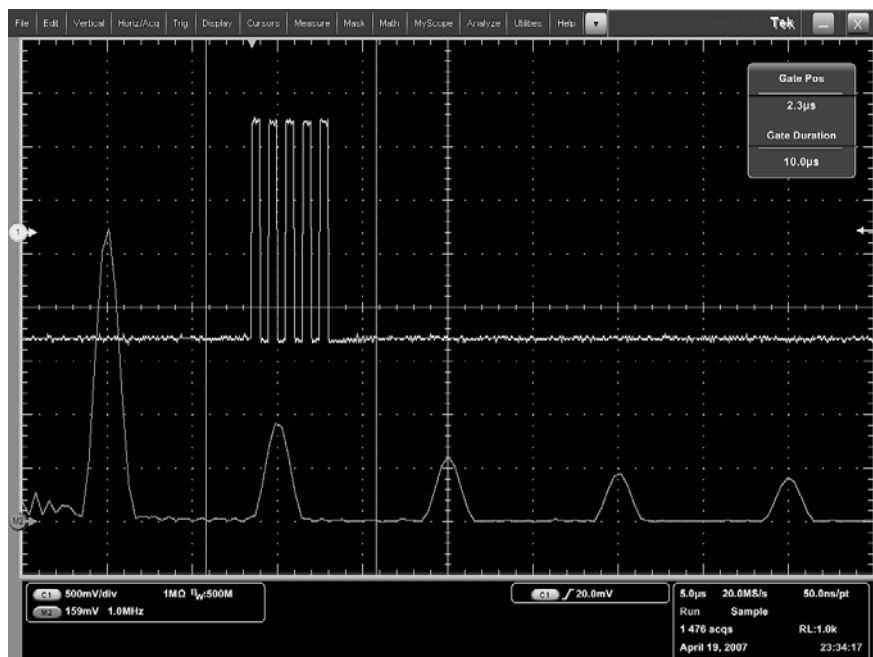


Рис. 5.19. Пример спектрального анализа выделенной пачки прямоугольных колебаний

Большинство анализаторов спектра умеренной стоимости строит спектр в виде пиков той или иной остроты, расположенных на частотной оси. Таким образом, спектр строится в плоскости уровень—частота. Вид и ширина пиков определяются характеристиками выбранного окна при оконном анализе спектра. Для спектрального анализа нестационарных сигналов, параметры которых меняются во времени, этот способ построения спектра не пригоден принципиально.

В связи с этим в последние годы были созданы анализаторы спектра реального времени, в которых с помощью окон строятся обычные спектры в отдельные моменты времени. Эти спектры суммируются, и строится так называемая спектрограмма — картина мгновенных спектров в плоскости частота—время с представлением амплитуды в каждой точке спектрограммы оттенками цвета (либо с трехмерным представлением спектра). Такой подход обеспечивает контроль изменений спектра во времени на некотором промежутке времени, зависящем от объема памяти, в которой хранятся спектры для выбранных моментов времени. Минимальное значение этого времени обычно составляет несколько секунд.

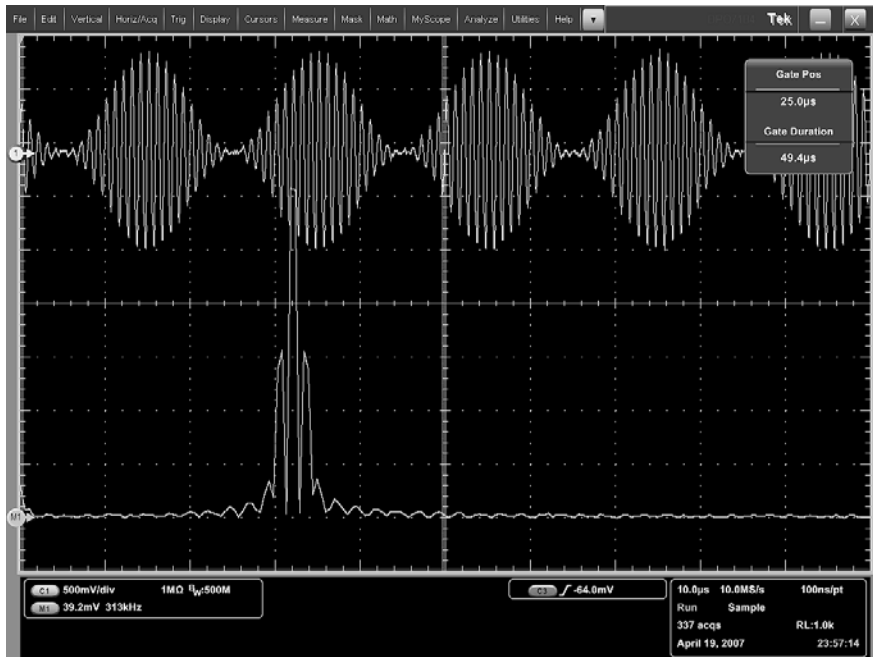


Рис. 5.20. Пример построения спектра АМ-сигнала

Именно этот подход, разумеется, с сохранением всех возможностей построения обычных спектров, реализуется в анализаторах спектра реального времени корпорации Tektronix (см. раздел 5.1.4). Не вдаваясь далеко в обширные применения этих дорогих и пока у нас редких приборов, рассмотрим несколько примеров их применения для спектрального анализа сигналов от генераторов типа AFG3000.

На рис. 5.21 представлен экран анализатора спектра реального времени RSA6100A корпорации Tektronix в режиме анализа спектра прямоугольного импульса со скважностью 10, поданного на вход анализатора спектра с выхода генератора AFG3152. Нужный диапазон частот выбирается выбором центральной частоты Central и полосы обзора Span. Разрешающая способность, задающая ширину пиков спектра, задается параметром RBW.

На рис. 5.21 представлены четыре формы представления спектров и иных характеристик из множества присущих этому анализатору спектров. Перечислим их слева-направо и сверху-вниз: зависимость амплитуды (мощности) сигнала от времени, спектрограмма, DPX спектр с использованием технологии цифрового фосфора и обычный спектр.

Зависимость мощности сигнала во времени, к сожалению, строится некачественно из-за ограничения полосы частот спектрального анализа, влияния шумов и артефактов преобразованного сигнала. Довольно редко она похожа на осциллограмму исследуемого сигнала. Спектрограмма — главное ноу-хау анализаторов спектра реального времени. В спектрограмме рис. 5.21 отчетливо видна стационарность исследуемого сигнала: все его спектральные линии выглядят как вертикальные линии, что указывает на отсутствие изменений их частоты во времени.

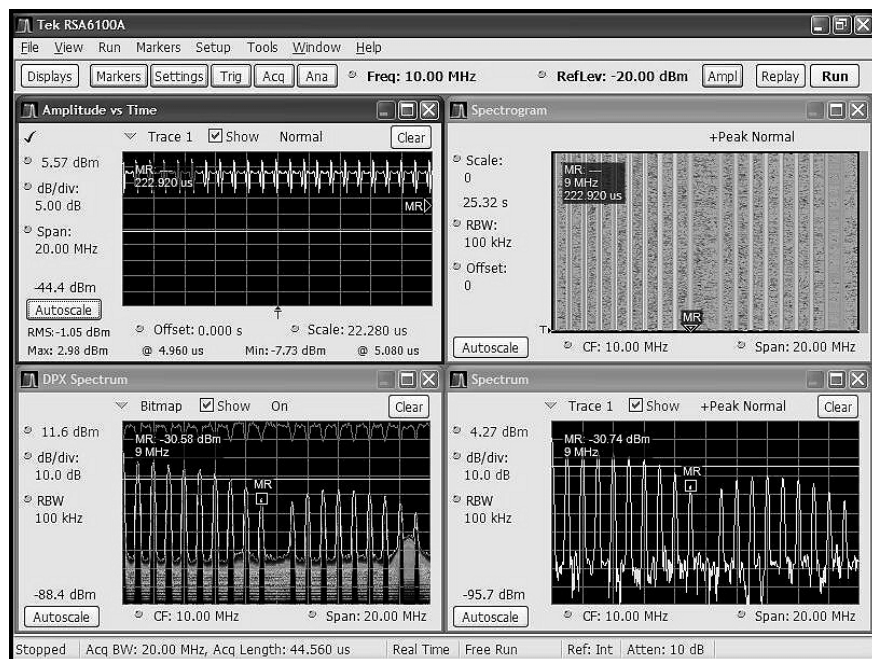


Рис. 5.21. Пример анализа спектра прямоугольного импульса со скважностью 10 с помощью анализатора спектра RSA6100A

DPX спектр — тоже новинка данных анализаторов спектра. Этот спектр динамический и постоянно меняется во времени (даже в случае стационарных сигналов их спектр меняется из-за присутствия шумов). При этом для отображения спектров используется технология цифрового фосфора, имитирующего послесвечение электронно-лучевой трубки. Скорость спектрального анализа по этой технологии в тысячи раз превосходит скорость обычного спектрального анализа (его результат также представлен в окне, расположенном справа и снизу). На рис. 5.22 показано построение DPX спектра отдельно с выводом панели установки параметров спектрального анализа (она показана внизу).

На рис. 5.22 показано также применение маркера для измерений уровня 11-ой гармоники спектра. Маркер можно перемещать по горизонтали. Возможна автоматическая его фиксация на пиках спектра. Обратите внимание на то, что в спектре явно нет 10-ой гармоники. Это полностью соответствует теоретическому виду спектра прямоугольных импульсов со скважностью, равной 10.

Разумеется, возможности этих анализаторов спектра нового поколения проявляются больше в тех случаях, когда обычные анализаторы спектра, в том числе программные цифровых осциллографов, дают недостаточно четкие результаты. На рис. 5.23 показан пример обнаружения спектра синусоидального сигнала с частотой 30 МГц от генератора AFG3152 в полосе частот 40 МГц эфира. На обычном спектре и спектрограмме отчетливо видна линия сигнала генератора (на нее установлен маркер). Но в

тоже время видны хаотические и нестационарные спектры различных источников электромагнитного излучения в указанной полосе частот. Характерен, к примеру, довольно широкий пик спектра с частотой в его центре около 10 МГц.

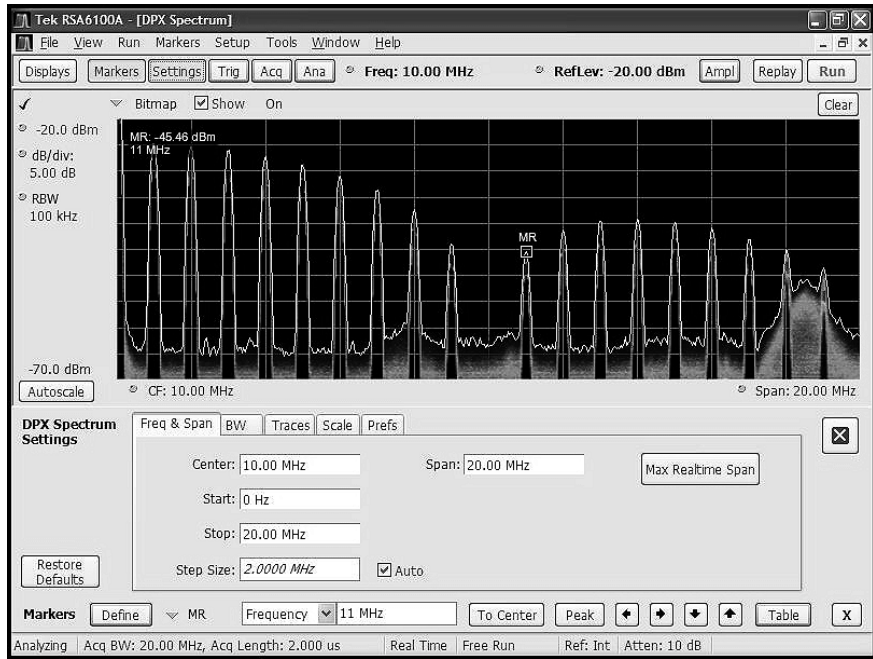


Рис. 5.22. Пример получения DPX спектра (сверху) и вывода панели установки параметров спектрального анализа (снизу)

Как уже отмечалось, большие трудности представляет анализ спектра амплитудно-модулированных сигналов, когда важны малые полосы частот разрешения RBW. Анализаторы спектра RSA6100A позволяют задавать полосы RBW вплоть до 1 Гц, что позволяет осуществлять очень детальный анализ спектров. Однако при таких полосах разрешения анализ спектра происходит очень медленно. На рис. 5.24 показан пример анализа спектра АМ-сигнала от генератора AFG3152 RBW=100 Гц. Этого разрешения оказалось вполне достаточно для четкого выделения линий несущей и боковых линий. Анализировался синусоидальный сигнал с несущей 10 МГц, промодулированный синусоидальным сигналом 10 МГц при 100%-ном коэффициенте модуляции.

Еще один интересный случай показан на рис. 5.25. Здесь на спектрограмме в первой половине анализа просматривался спектр широкополосного сигнала с частотной модуляцией синусоидальных сигналов. На спектрограмме отчетливо виден момент переключения и фрагмент спектрограммы для уже исчезнувшего сигнала. Внизу виден спектр сигнала с синусоидальной частотной модуляцией. Этот пример хорошо иллюстрирует применение анализатора спектра реального времени для анализа нестационарного сигнала с нестационарным спектром.

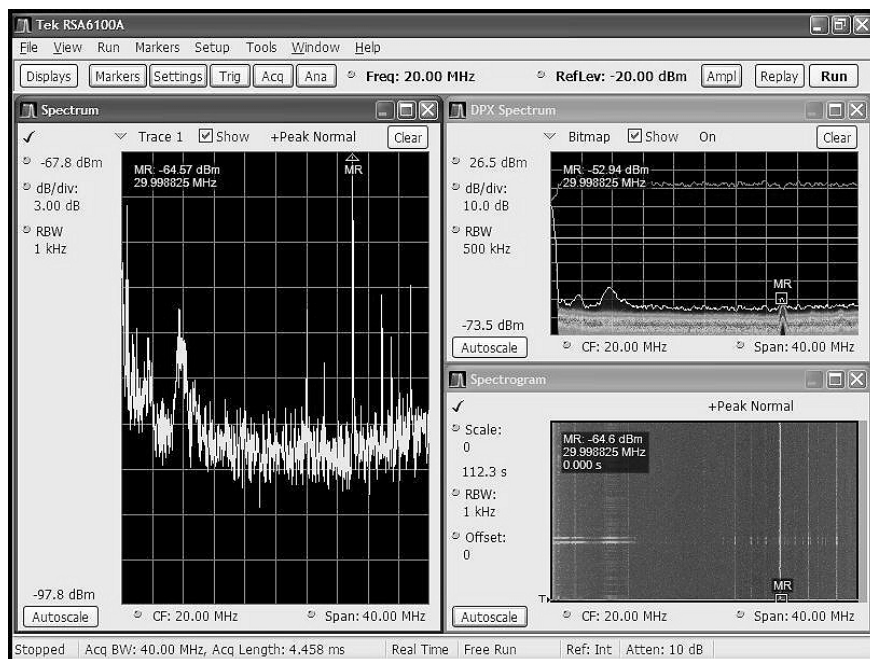


Рис. 5.23. Пример анализа спектра множества сигналов в полосе частот 40 МГц

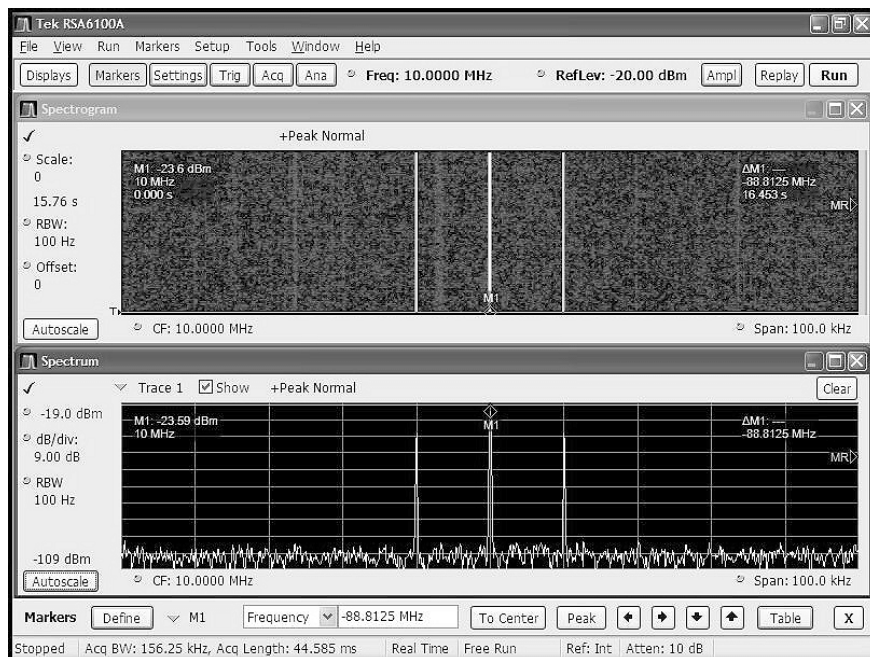


Рис. 5.24. Пример анализа спектра АМ-сигнала

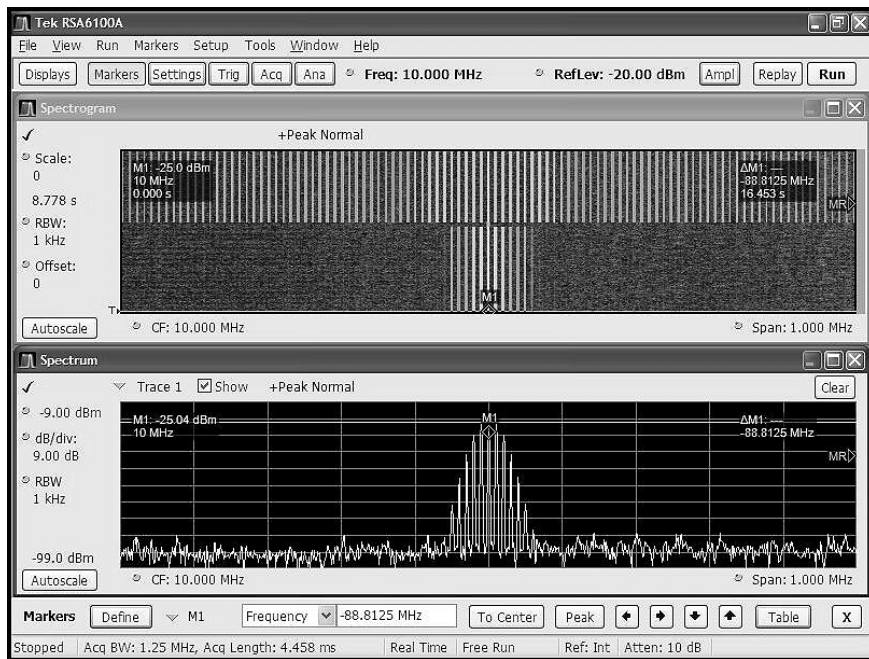


Рис. 5.25. Пример анализа спектра нестационарного сигнала

Время, в течение которого спектрограмма дает спектр в реальном масштабе времени, зависит от ширины полосы просмотра спектра и объема памяти под спектрограмму. Например, для рис. 5.25 оно составляет 16,493 с, из которых 8,778 с приходится на вторую половину анализа.

5.3. Примеры применения генераторов сигналов

5.3.1. Применение AFG3000 для запуска формирователей импульсов со временами нарастания и спада до 50 пс

Выпуск фирмой Tektronix бюджетных моделей генераторов сигналов произвольной формы серии AFG3000 открывает широкие возможности в исследовании и тестировании самой различной и массовой аппаратуры [2, 94]. К достоинствам этих приборов относятся: простой и удобный интерфейс, широкий диапазон амплитудных временных и частотных параметров сигналов, большое разнообразие их форм, высокая (до 10^{-6} в год) стабильность частоты повторения сигналов и легкость стыковки с персональным компьютером.

Однако минимальная длительность перепадов импульсного сигнала у этих приборов равна 10/5/2,5 нс (в зависимости от модели), что явно недостаточно для снятия

переходных характеристик широкополосных импульсных цепей и скоростных устройств, включая современные электронные осциллографы. В тоже время надо отметить, что при использовании согласованной нагрузки с сопротивлением 50 Ом формируемый генераторами перепад напряжения практически не содержит выбросов (рис. 5.26). Он может использоваться как измерительный при исследовании цепей и устройств (например, осциллографов) с полосой частот в десятки МГц и ниже.

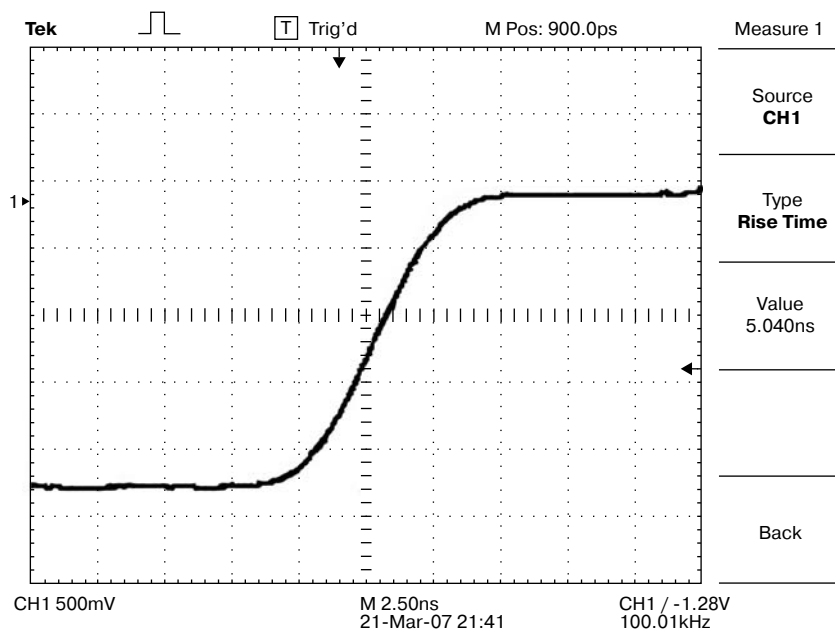


Рис. 5.26. Передний фронт импульсов генератора AFG3101 (осциллограмма получена с помощью осциллографа TDS 2024В фирмы Tektronix)

Для снятия переходных характеристик современных осциллографов желательно иметь импульсы с перепадами напряжения длительностью намного меньше 1 нс. В тоже время амплитуда импульсов вполне достаточна в доли вольт. Для получения таких импульсов можно использовать давно известные сверхскоростные полупроводниковые приборы — *туннельные диоды*. Рис. 5.27 показывает схему *формирователя импульсов на туннельном диоде* и его вольт-амперную характеристику с выбором не ней рабочих точек при переключении диода.

Предположим, что входной сигнал $E(t)$ формирователя синусоидальный. При увеличении входного сигнала линия нагрузки R_r (фактически, это выходное 50-омное сопротивление генератора) перемещается вверх, пока не достигнет положения А при входном сигнале, равном E_{12} (от 1,5 до 2,5 В). В этот момент рабочая точка 1 отрывается от ВАХ и скачком перемещается в положение 2. В результате формируется перепад напряжения с амплитудой около 0,5–0,6 В (для германиевых приборов) и малой (субнаносекундной) длительностью.

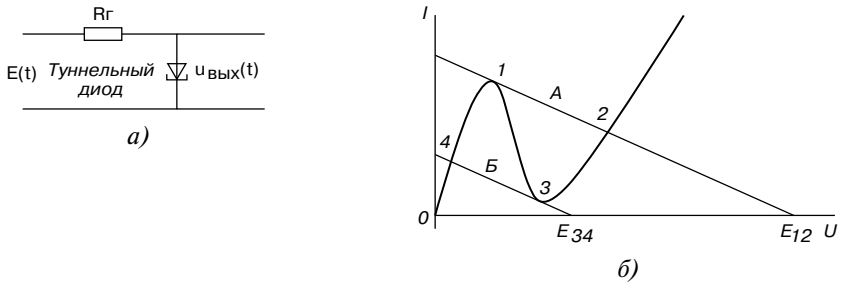


Рис. 5.27. Схема формирователя импульсов с длительностями фронтов на туннельном диоде (а) и N-образная вольт-амперная характеристика туннельного диода (б)

Оценим хотя бы грубо длительность перепада напряжения при переходе рабочей точки из положения 1 в положение 2. Будем считать, что переключение идет током, равным пиковому току диода I_n . Тогда длительность перепада $\Delta t \approx C \Delta U / I_n$. Для германиевого туннельного диода 1И308К, специально созданного для формирователей импульсов с субнаносекундной длительностью фронтов, емкость диода $C = 5 \text{ пФ}$, ток пика $I_n = 50 \text{ мА}$, таким образом, при $\Delta U = 0,5 \text{ В}$ получим $\Delta t = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 / 0,05 = 5 \cdot 10^{-11} \text{ с} = 50 \text{ пс}$. Этот прикидочный расчет показывает, что возможно формирование импульсов со временем нарастания в 50 пс.

При уменьшении входного сигнала линия нагрузки начинает перемещаться вниз, пока не займет критическое положение Б при уровне входного сигнала E_{34} (доли вольт). При этом рабочая точка 3 скачкообразно перемещается в положение 4, формируя также быстрый перепад напряжения отрицательной полярности. Амплитуда этого перепада немного меньше, чем положительного перепада, создаваемого при нарастании синусоидального напряжения.

Для получения реальной длительности фронтов порядка 50 пс необходима тщательная оптимизация довольно простой конструкции формирователя в виде литого корпуса с установленным в нем туннельным диодом, имеющим таблеточную конструкцию для уменьшения индуктивности. Отечественная промышленность давно выпускала формирователи на туннельном диоде для стробоскопических осциллографов С1-91 и других с полосой исследуемых частот до 18 ГГц. На рис. 5.28 показан внешний вид формирователя Ф-02 с СВЧ узлами для подключения его к выходу генератора AFG3101 и входу осциллографа.

Для испытания формирователя целесообразно вначале опробовать его работу при синусоидальном входном сигнале генератора AFG3101. Поскольку этот формирователь создан для генерации основного отрицательного перепада, выходной сигнал генератора укладывается в область напряжений с нулевым верхним уровнем и регулируемым нижним уровнем. Задав частоту 100 кГц и меняя нижний уровень напряжения, можно заметить момент, когда формирователь начинает генерировать сигнал разрывной формы (рис. 5.29). Разумеется, можно в широких пределах менять частоту генератора и выходных импульсов.



Рис. 5.28. Внешний вид формирователя Φ -02 и СВЧ узлов импульсного 50-омного тракта (1 — переходник к входному разъему CNN, 2 — формирователь Φ -02, 3 — разъем выхода формирователя, 4 — тройник, 5 — выходной разъем, 6 — 50-омная заглушка)

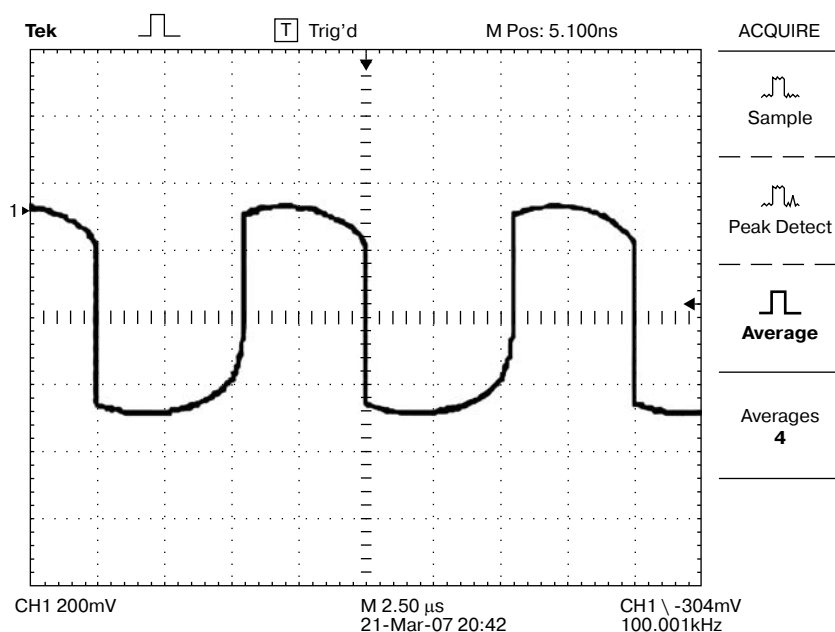


Рис. 5.29. Формирование из синусоиды сигнала разрывной формы

Теперь для получения почти идеальных прямоугольных импульсов достаточно перевести генератор AFG3101 в режим генерации прямоугольных импульсов. При этом собственные перепады напряжения генератора с длительностью около 5 нс (рис. 5.26) уменьшаются по длительности примерно в 100 раз и составят около 50 пс. Форма пря-

моугольных импульсов на выходе формирователя показана на рис. 5.30. Она получена с помощью цифрового 200 МГц осциллографа TDS-2024В. Это 4-канальный бюджетный осциллограф, рассчитанный на самое широкое применение, является расширением популярной линии приборов TDS-2000 [2]. Осциллографы, как и генераторы серии AFG3000, имеют расширенные возможности связи с персональным компьютером через интерфейс USB. В частности, благодаря этому и получены копии экрана осциллографа со всеми осциллограммами, приведенными в данной статье.

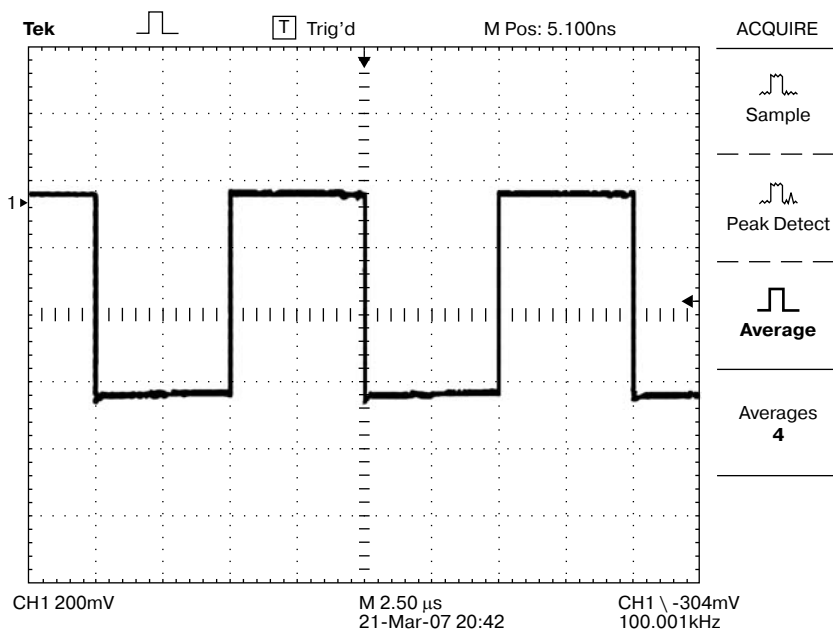


Рис. 5.30. Осциллограмма выходных прямоугольных импульсов формирователя на туннельном диоде

Чтобы оценить реальную длительность формируемого перепада, необходимо посмотреть его на осциллографе с полосой частот исследуемых сигналов до 15–20 ГГц. На рис. 5.31 показана осциллограмма, снятая с помощью стробоскопического осциллографа С1-91/4 с 18 ГГц стробоскопическим преобразователем Я4С-100 и блоком стробоскопической развертки А4С-101. Этот довольно громоздкий осциллограф имеет блок генератора перепадов Я4С-89, от которого и взят формирователь, показанный на рис. 5.28.

В состав генератора Я4С-89 входят еще два формирователя для формирования перепадов положительной $\Phi-00$ (0,2 В, 50 пс) и отрицательной и $\Phi-02$ (0,2 В, 70 пс) полярности. Эти формирователи также могут использоваться совместно с генератором AFG3000 и дают несколько меньшие искажения плоской вершины из-за отражений в коаксиальных кабелях и разъемах. Последнее достигается включением в тракт 50-омного резистора после туннельного диода.

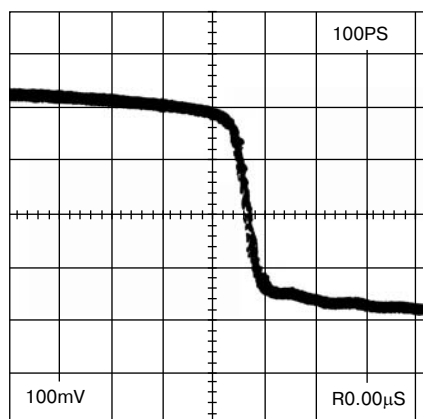


Рис. 5.31. Осциллограмма перепада формируемого формирователем на туннельном диоде, снятая 18 ГГц стробоскопическим осциллографом

Применение формирователей на туннельных диодах совместно с самым современным генератором серии AFG3000 позволяет получить ряд преимуществ, в сравнении с их применением в составе генератора перепадов Я4С-89:

- возможность установки частотных и временных параметров импульсов в исключительно широких пределах;
- высокая стабильность частоты повторения импульсов;
- малые габариты и масса генератора с формирователем;
- возможность управления от персонального компьютера с USB-интерфейсов;
- возможность работы с современными (в том числе бюджетными) цифровыми осциллографами фирмы Tektronix.

Благодаря очень малой длительности формируемых перепадов с помощью генераторов серии AFG3000 с формирователем на туннельном диоде можно оценивать время нарастания скоростных осциллографов с полосой исследуемых частот от 0,1 до 10 ГГц. При этом у осциллографов с полосой частот до 1 ГГц фактически оценивается предельная форма переходной характеристики — реакция на идеальный скачок. Даже у осциллографов с близкой полосой исследуемых частот эта характеристика может сильно отличаться (см. примеры ниже).

На рис. 5.32 показана реакция на 50 пс отрицательный перепад цифрового осциллографа TDS 2024В фирмы Tektronix с полосой частот 200 МГц. Хотя она имеет заметный выброс, признаков колебания переходной характеристики нет. Это характерно и для реакции данного осциллографа на положительный перепад. Время нарастания переходной характеристики на отрицательный рабочий перепад составило около 2 нс, что полностью соответствует паспортному значению этого параметра (не более 2,1 нс). Реакция осциллографа на положительный перепад показана на рис. 5.33. За исключением смены полярности перепада, она аналогична реакции на отрицательный перепад.

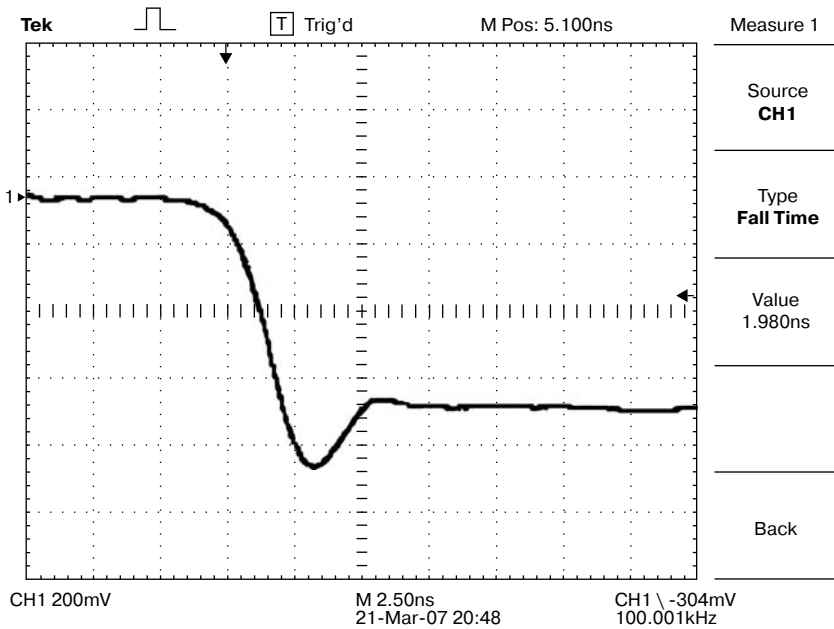


Рис. 5.32. Реакция 200 МГц цифрового осциллографа TDS 2024В на отрицательный перепад

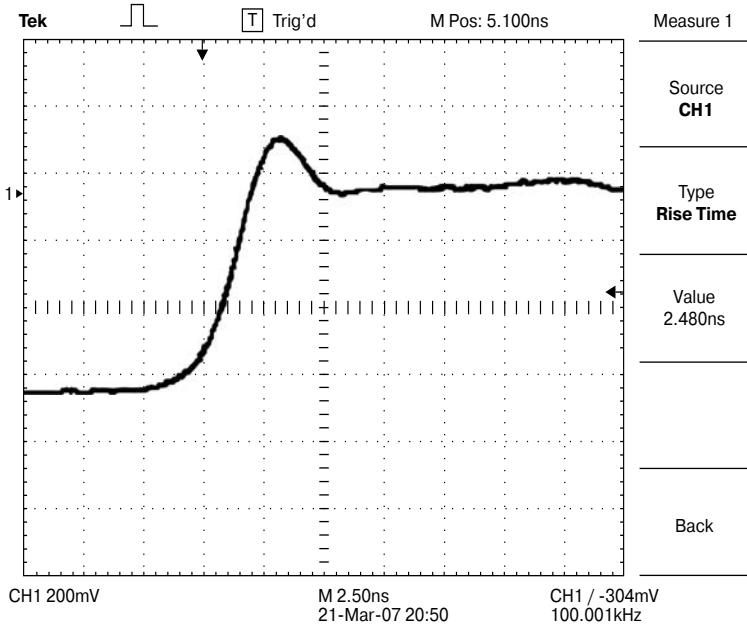


Рис. 5.33. Реакция 200 МГц цифрового осциллографа TDS 2024В на положительный перепад

Реакция другого цифрового осциллографа (DS-1250 фирмы EZ Digital) с полосой исследуемых частот до 250 МГц показана на рис. 5.34. Этот прибор имеет немного меньшее время нарастания переходной характеристики (до 1,4 нс), но после перепада хорошо видны значительные затухающие колебания после выброса.

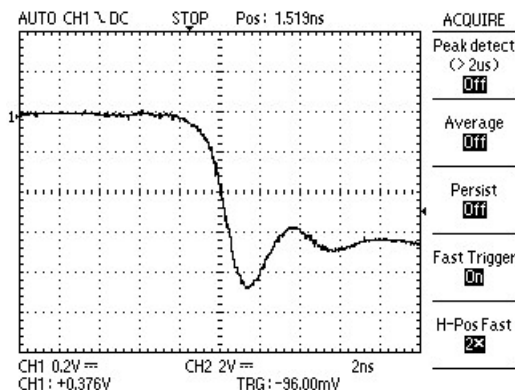


Рис. 5.34. Реакция 250 МГц осциллографа DS-1250 фирмы EZ Digital на отрицательный перепад

Такая форма переходной характеристики ведет к значительным искажениям формы прямоугольных импульсов. На рис. 5.35 показана осциллограмма импульсов с частотой 10 МГц, поданных на канал осциллографа с формирователя на туннельном диоде. Здесь также нетрудно заметить отсутствующие у входных импульсов колебания на фронтах. Можно сказать, что у этого осциллографа форма наблюдаемых импульсов (меандра) явно принесена в жертву получению предельно малого (для полосы 250 МГц) времени нарастания.

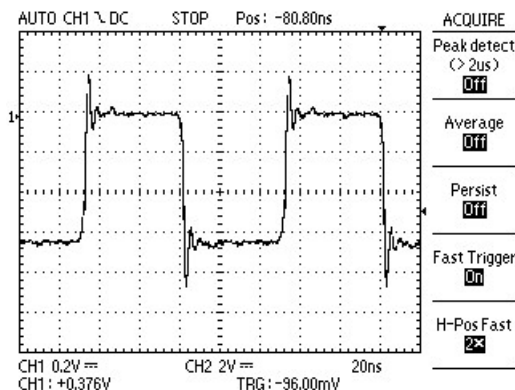


Рис. 5.35. Реакция 250 МГц осциллографа DS-1250 фирмы EZ Digital на меандр с частотой 10 МГц

Применение туннельных диодов с меньшим пиковым током позволяет получить перепады напряжения с большей (в несколько раз) длительностью. Выброс переход-

ной характеристики и ее колебания при использовании для контроля таких формирователей могут быть заметно уменьшены. Для увеличения времени перепадов можно рекомендовать также шунтирование туннельного диода конденсатором малой емкости с выводами, имеющими предельно малую индуктивность, например таблеточного типа.

Описанные формирователи импульсов можно использовать для запуска сверхскоростных устройств, например, на лавинных транзисторах, туннельных диодах и широкополосных операционных усилителях, для оценки реакции цепей с сосредоточенными параметрами, проверки согласования СВЧ и импульсных коаксиальных и микрополосковых трактов и в рефлектометрах, основанных на регистрации отражений от неоднородностей широкополосных трактов.

5.3.2. Измерение АЧХ осциллографов

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) осциллографа — это зависимость размаха осциллограммы синусоидального сигнала от его частоты. Измерение АЧХ-каналов вертикального (иногда и горизонтального) отклонения осциллографов выполняется подачей на вход синусоидального сигнала от подходящего генератора с рядом частот и постоянной амплитудой. При этом вычисляется амплитуда этого сигнала по осциллограмме и строится график АЧХ.

Верхняя частота среза осциллографа определяется как частота сигнала, на которой его измеренная амплитуда падает до уровня 0,7 (-3 дБ) от уровня синусоиды на низкой частоте — обычно 1 кГц или даже относительно значения АЧХ на нулевой частоте. Чаще всего АЧХ осциллографа соответствует АЧХ НЧ-фильтра Гаусса и имеет монотонный спад по мере роста частоты сигнала (рис. 5.36).

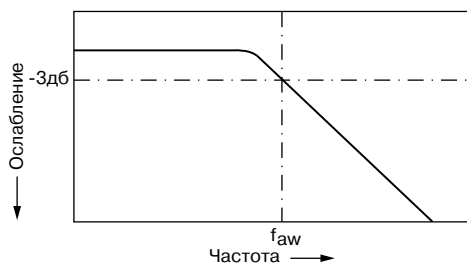


Рис. 5.36. Типичная АЧХ осциллографа в логарифмическом масштабе

Как известно, такая АЧХ дает переходную характеристику без выброса. Но из-за наличия в усилителе Y корректирующих цепей и паразитных индуктивностей у пластин трубки, нередко АЧХ отклоняется от гауссовской (дает более резкий переход с горизонтального участка к наклонному), что ведет к появлению выброса переходной характеристики осциллографа и даже его колебательному характеру. Это характерно как для аналоговых осциллографов, так и цифровых.

Единственной проблемой при измерениях АЧХ является выбор подходящего генератора. Он должен иметь максимальную частоту синусоидального сигнала, в 2–3 раза превышающую верхнюю частоту среза осциллографа $f_{\text{ВВ}}$. Так, для осциллографов с полосой частот до 100 МГц вполне подойдет генератор AFG3152 с максимальной частотой генерации синусоидального напряжения 240 МГц.

Почти идеально для этого вида измерений подходят современные генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов синусоидальной формы. Умеренную стоимость имеют такие генераторы с максимальной частотой 3 ГГц, более высокочастотные генераторы — довольно дорогие устройства. Некоторые генераторы работают как ГКЧ и позволяют строить график АЧХ. Эта возможность описана ниже.

5.3.3. Проверка переходных характеристик осциллографов

Переходной характеристикой осциллографа называют его реакцию на единичный перепад напряжения с бесконечно малым временем перехода. Для проверки переходной характеристики осциллографа достаточно подать на него импульсный сигнал от генератора перепадов или импульсов и установками синхронизации и развертки добиться наблюдения фронта импульса. Время нарастания переходной характеристики на практике обычно определяется как время, отсчитанное на уровнях роста напряжения от 0,1 до 0,9 от амплитуды перепада (импульса), видимого на экране. Однако у скоростных осциллографов эти уровни иногда берутся другими — 20 и 80%.

Измерение временных параметров широкополосных аналоговых осциллографов связано с большими проблемами. Такие измерения приходится выполнять на самых коротких развертках, но даже в этом случае развернуть фронт импульса на значительную часть экран удается далеко не всегда. Кроме того, надо обеспечить время нарастания испытательного импульса $t_{\text{фи}} \ll t_{\text{фо}}$, где $t_{\text{фо}}$ — время нарастания осциллографа. Поскольку $t_{\text{фо}} = 0,35f_{\text{В}}$, то уже для 350 МГц осциллографа имеем $t_{\text{фо}} = 1$ нс, т. е. для испытания такого осциллографа нужны испытательные импульсы с временем нарастания заметно меньше 1 нс. Если по осциллограмме определить $t_{\text{осц}}$, то время нарастания осциллографа можно уточнить по формуле:

$$t_{\text{фо}} = \sqrt{t_{\text{осц}}^2 - t_{\text{фи}}^2}. \quad (5.2)$$

Например, если $t_{\text{осц}} = 2$ нс, а $t_{\text{фи}} = 1$ нс, то $t_{\text{фо}} = 1,73$ нс.

Исходя из этих соображений ясно, что генератор AFG3000 даже старшей модели (AFG3152) можно использовать для снятия переходной характеристики осциллографов с полосой частот примерно до 50 МГц, имеющих $t_{\text{фо}} = 0,35/50 = 7$ нс, что примерно втрое больше времени нарастания импульсов генератора (не более 2,5 нс).

Для снятия переходных характеристик осциллографов с полосой частот 1 ГГц и выше, имеющих $t_{\text{фо}} = 0,35$ нс, могут использоваться генераторы перепадов с длительностью менее 100 пс, например, генераторы на туннельных диодах (см. раздел 5.3.1) или генераторы фирмы Pikosecond.

Если достаточно малая длительность перепада импульсов обеспечена, то измерение времени нарастания теперь уже осциллографа может выполняться как автоматическое (см. рис. 5.17 и раздел 5.2.5).

5.3.4. Применение AFG3000 для измерения добротности LC-контуров

Одним из хорошо известных устройств измерительной техники еще недавно был радиочастотный *измеритель добротности (Q-метр)*. Однако в последнее время приборы этого типа на рынке исчезли. Их место заняли дешевые цифровые *RCL*-измерители, измерения добротности у которых выполняются в лучшем случае на нескольких фиксированных и достаточно низких частотах. Между тем, при настройке и исследовании колебательных контуров, различных резонансных цепей и фильтров весьма важно их изучение на тех частотах, на которых они реально работают. Связано это с тем, что из-за поверхностного эффекта сопротивление потерь *LCR*-цепей на частотах резонанса намного отличается от сопротивления потерь на низких (измерительных) частотах. Необходимо также получать их реальные АЧХ, измерители которых ныне тоже стали редкими и дорогими приборами.

Лаборатория, содержащая генератор AFG3000 и осциллограф TDS 2000B, вполне способна восстановить статус-кво в этой области. Генераторы серии AFG3000 покрывают исключительно широкий диапазон частот синусоидальных колебаний — от 1 мГц (и даже 1 мкГц с новой прошивкой) до 50, 100 и 240 МГц в зависимости от используемой модификации. Автор использовал, к примеру, прибор AFG3101 с максимальной частотой генерации синусоидальных колебаний до 100 МГц. Это позволяет исследовать практически все возможные линейные устройства и системы с сосредоточенными постоянными *R*, *L* и *C* — от сверхнизкочастотных до радиочастотных и ближней области СВЧ.

Существует в корне неверное мнение о том, что генераторы с цифровым синтезом частоты (к ним относятся AFG3000) неудобны для снятия характеристик высокодобротных цепей с узкими резонансными кривыми из-за дискретности изменения частоты при ее изменении. На самом деле генераторы серии AFG3000 прекрасно приспособлены для этого. Простым нажатием кнопок \leftarrow и \rightarrow под единственной круглой ручкой регулировки выбранного параметра (в нашем случае частоты) можно менять разрешение от 0,001 (и даже 10^{-6}) Гц до 10 МГц, а вращением универсальной круглой ручки ступенчато менять частоту с выбранным разрешением. При малых разрешениях изменение частоты на каждом шаге получается настолько малым, что ощущается практически как плавное.

Куда важнее, что при этом сохраняется высочайшая стабильность частоты (до 10^{-6} в течение года!), совершенно недостижимая в старых моделях генераторов и *Q*-метров с обычными недостаточно стабильными *LC*-генераторами. Это облегчает поиск острых пиков резонансных кривых у высокодобротных цепей и фиксацию частоты в них.

Немаловажным достоинством генераторов серии AFG3000 является высокая стабильность амплитуды генерируемых сигналов (в том числе синусоидальных) и малая неравномерность зависимости амплитуды от частоты в пределах всего частотного диапазона. Это позволяет отказаться от коррекции амплитуды испытательного сигнала. Кроме того, есть возможность изменения выходного сопротивления (по умолчанию 50 Ом) и высокоточного цифрового контроля всех параметров сигналов.

Рис. 5.37 показывает измерительную схему для исследования и настройки резонансных LCR-контуров. Основной схемой является резонансный последовательный контур, подключенный к генератору синусоидальных колебаний AFG3000 через согласующий делитель напряжения с входным сопротивлением 50 Ом и выходным 0,5 Ом. Коэффициент передачи делителя равен 1:100, так что при подаче $U_z=10$ В (межпикового напряжения) на контур подается напряжение $U_{\text{вх}}=0,1$ В. Этого напряжения вполне достаточно для раскачки контура. Малое выходное сопротивление делителя, намного меньшее последовательного сопротивления r большинства контуров, позволяет оценивать реальную добротность Q радиочастотных и (тем более) низкочастотных контуров.

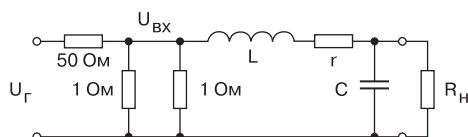


Рис. 5.37. Измерительная схема для измерения параметров LCR-контуров

Изменяя вручную частоту синусоидального сигнала генератора, можно найти максимум напряжения на конденсаторе C контура — $U_{\text{вых}}$. Для контроля выходного напряжения можно использовать любой подходящий ВЧ-вольтметр или милливольтметр. Однако его функции с успехом может выполнять любой канал осциллографа TDS 2000В. Для уменьшения погрешности от шунтирования контура входным сопротивлением осциллографа надо работать со щупом при установке коэффициента деления в положение 1:10. При этом входная емкость осциллографа составляет около 15 пФ (она входит в состав емкости C), а входное сопротивление 10 МОм (оно является нагрузкой для схемы на рис. 5.37 и обозначено как $R_{\text{н}}$).

Как известно, без учета $R_{\text{н}}$ полное сопротивление последовательного контура

$$Z(f) = r + j(2\pi fL - 1/(2\pi fC)) \quad (5.3)$$

имеет комплексный характер. На резонансной частоте мнимая часть Z равна 0, что определяет резонансную частоту контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.4)$$

Другим важным параметром является добротность контура — отношение индуктивного или емкостного сопротивления на резонансной частоте к сопротивлению потерь r . Известен ряд формул для добротности, например:

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{r} = \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right)_{f=f_0} = \frac{f_0}{2\Delta f}, \quad (5.5)$$

где $2\Delta f$ — полоса пропускания, измеренная на уровне спада резонансной кривой до уровня 0,707 от максимума.

Частоту резонанса f_0 можно определить по установке частоты генератора и по показаниям встроенного в осциллограф цифрового частотомера в точке максимума выходного напряжения. А в режиме автоматических измерений осциллографа TDS 2000В нетрудно определить $U_{\text{вых}}$ и оценить добротность $Q = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$. Например, для контура с $L=470$ мкГн и $C=135$ пФ экспериментально была определена частота $f_0=629,8$ кГц при расчетном значении 631,8 кГц. Расхождение находится в пределах допусков на величины L и C . При $U_{\text{вх}}=0,1$ В и $U_{\text{вых}}=8,2$ В измеренное значение $Q=82$. Зная L , C и Q , можно из формулы (2) определить сопротивление потерь контура r на резонансной частоте.

Сделав на основе схемы (рис. 5.37) небольшую приставку к генератору и милливольтметру (или осциллографу), можно получить вполне полноценный Q -метр. Конденсатор C можно выполнить в виде переменного конденсатора, отградуированного в пикофарадах. Это облегчит испытание контуров, резонирующих на заданной частоте, например входных контуров радиоприемных устройств.

5.3.5. Применение AFG3000 в качестве генератора качающейся частоты

Используя режим качания частоты генератора AFG3000, можно превратить его в генератор качающейся частоты, который, совместно с осциллографом серии TDS 2000, образует вполне современный полноценный измеритель АЧХ линейных устройств и систем. Качание частоты возможно по линейному или логарифмическому закону. Можно задавать нижнюю и верхнюю частоты качания, либо среднюю частоту и девиацию частоты.

Осциллограммы АЧХ можно вводить в персональный компьютер с помощью программы OpenChoice Desktop, поставляемой с осциллографами серии TDS-2000. Полноценную АЧХ можно получить, подключив осциллограф через достаточно высокочастотный диод. Такая АЧХ представлена на рис. 5.38.

При ее получении используется режим персистенции, что удаляет небольшие погрешности осциллограммы АЧХ, например шумы, наводки и ВЧ-пульсации выходного сигнала. С помощью курсорных измерений, применяя вертикальные курсоры, можно оценить полосу частот резонансной кривой на уровнях ее спада 0,707 от пика на резонансной частоте 660 кГц (ее возрастание связано с уменьшением емкости C на величину входной емкости осциллографа, которая равна 15 пФ). Это дает временной интервал $\Delta t=14,8$ мс или частотный интервал $2\Delta f=7,25$ кГц. Таким образом, добротность контура в этом случае $Q=660/7.25=91$.

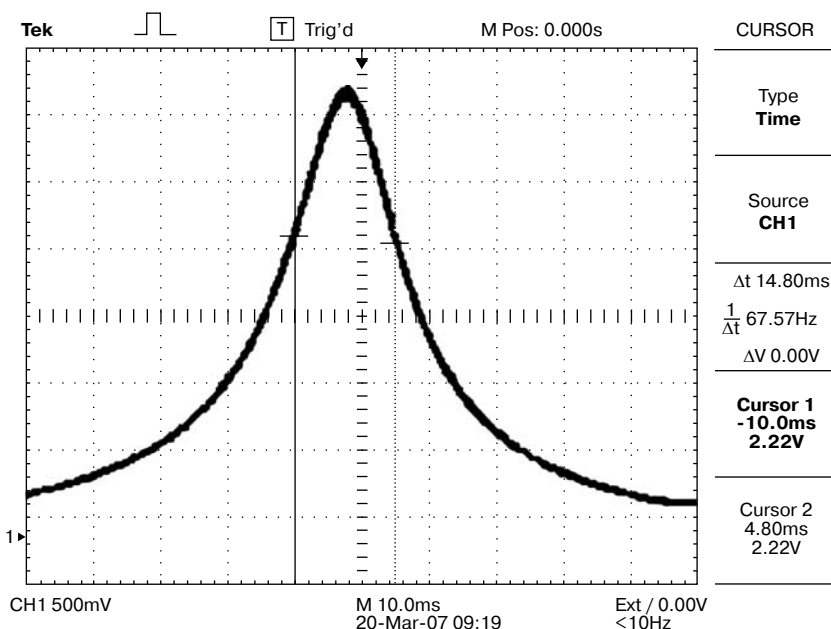


Рис. 5.38. АЧХ контура и пример использования курсорных измерений

5.3.6. Применение функциональных генераторов в качестве ГКЧ

В качестве *генераторов качающейся частоты* (ГКЧ) могут использоваться и обычные довольно дешевые функциональные генераторы. К таким приборам относятся функциональные генераторы фирмы METEX. В генераторах имеется встроенная схема развертки, которая позволяет превратить его в генератор качающейся частоты. Качание может осуществляться как по линейному, так и логарифмическому законам. Время качания регулируется от 20 мс до 2 с. При этом отношение максимальной частоты к минимальной может достигать до 100 раз и более. Есть также возможность управления частотой напряжением, поданным на вход VCF IN (от 0 до 10 В).

При использовании прибора в качестве генератора качающейся частоты он может быть подключен к аналоговому сервисному осциллографу ОСУ-20 (рис. 5.39 сверху). Таким образом, образуется простая схема измерения АЧХ.

Недостаток такой простой блок-схемы АЧХ заключается в необходимости регулировки запуска развертки и ее частоты. Изменение полосы качания или частоты встроенной в функциональный генератор развертки ведет к необходимости подстройки осциллографа. Это вполне обычная подстройка, так что получить на экране осциллографа устойчивое изображение кривой АЧХ не так уж и сложно. Однако точный контроль диапазона частот в этом случае затруднен.

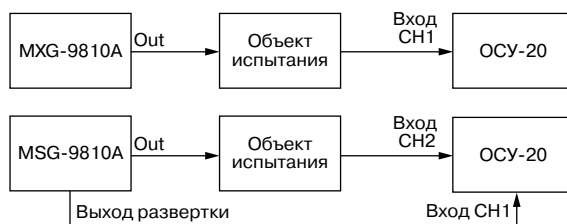


Рис. 5.39. Блок-схемы построения АЧХ-объекта

Для проверки работы простейшей схемы измерителя АЧХ возьмем в качестве испытуемого объекта дифференцирующую RC -цепь ($R=750$ Ом, $C=150$ пФ) с малой постоянной времени. Как известно, такая цепь имеет практически линейную амплитудно-частотную характеристику, если период сигнала остается заметно больше, чем ее постоянная времени. Осциллографирование (см. рис. 5.40) показало, что АЧХ RC -цепи действительно практически линейная.

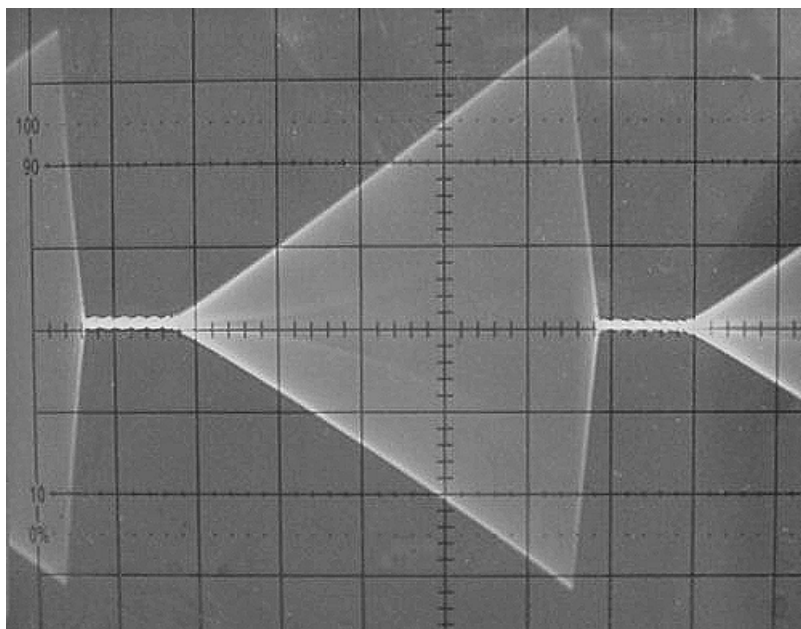


Рис. 5.40. Осциллограмма сигнала на выходе RC -цепи при линейном качании частоты

При переключении развертки прибора MSG-10A на логарифмический масштаб, АЧХ должна была смениться на экспоненциальную. Это и произошло (см. рис. 5.41).

Эти примеры говорят о высокой эффективности функциональных генераторов серии MSG в роли генераторов качающейся частоты при изменении частоты в широких пределах (от нескольких раз до десятков, а порою и сотен раз). Как недостаток приборов в таком применении стоит отметить отсутствие выхода внутренней развертки или сигнала синхронизации с ней в большинстве генераторов (хотя на задней стенке при-

боров предусмотрены отверстия для разъема такого выхода). Это затрудняет синхронизацию исследуемых процессов с аналоговым осциллографом. Однако, как видно из рис. 5.40 и 5.41, она вполне возможна. Органами управления генератора и развертки осциллографа можно вывести на экран осциллографа нужный участок исследуемой АЧХ.

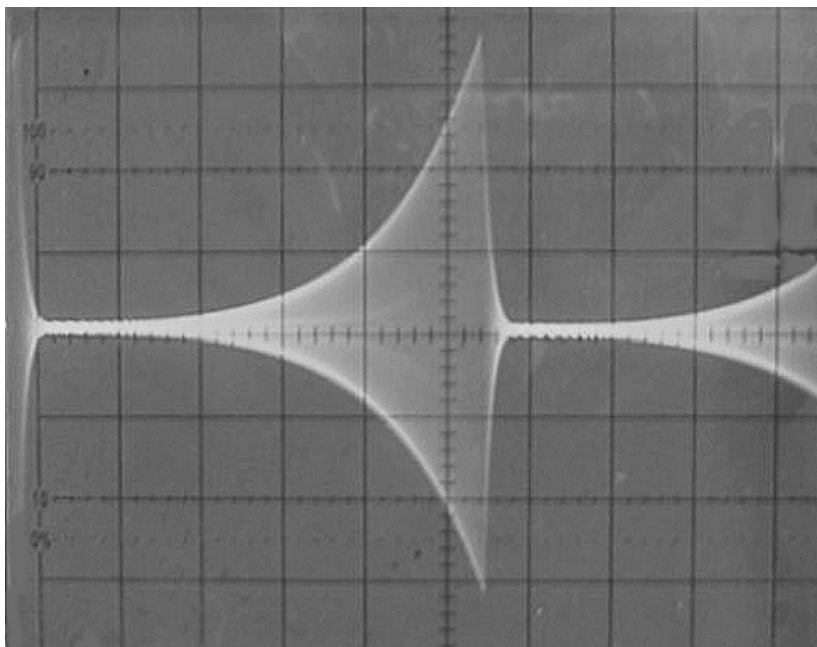


Рис. 5.41. Осциллограмма сигнала на выходе RC-цепи при логарифмическом качании частоты

Вполне полноценный высокочастотный ГКЧ и измеритель АЧХ легко создать, просто подключив к объекту испытаний функциональный генератор и осциллограф (рис. 5.38 сверху). Если снимается АЧХ высокочастотных цепей, то между испытуемым устройством и осциллографом нужно включить ВЧ-диод. Он, вместе с входной емкостью осциллографа, образует диодный детектор, обеспечивающий построение АЧХ в виде линии. Большое выходное напряжение функционального генератора (несколько вольт) позволяет получить вполне линейное детектирование даже при применении кремниевых диодов.

Если функциональный генератор имеет выход развертки (при его отсутствии в MSG-9810A такой выход нетрудно добавить), то лучшие возможности дает применение осциллографа в режиме XY (рис. 5.38 снизу). При этом на вход X канала CH1 подается сигнал развертки, а на вход Y канала CH2 подается сигнал с выхода испытуемого устройства (в случае необходимости через диод).

Но и приведенные блок-схемы не являются единственными. Если осциллограф имеет выход генератора развертки, то можно подключить его к входу VCF IN функционального генератора.

На рис. 5.42 показана АЧХ двухконтурного полосового фильтра промежуточной частоты от профессионального радиоприемника при использовании блок-схемы, показанной на рис. 5.38 снизу. От вида измерительной блок-схемы вид АЧХ практически не зависит. Хорошо видны два горба АЧХ, которые характерны при связи между LC -контурами больше критической.

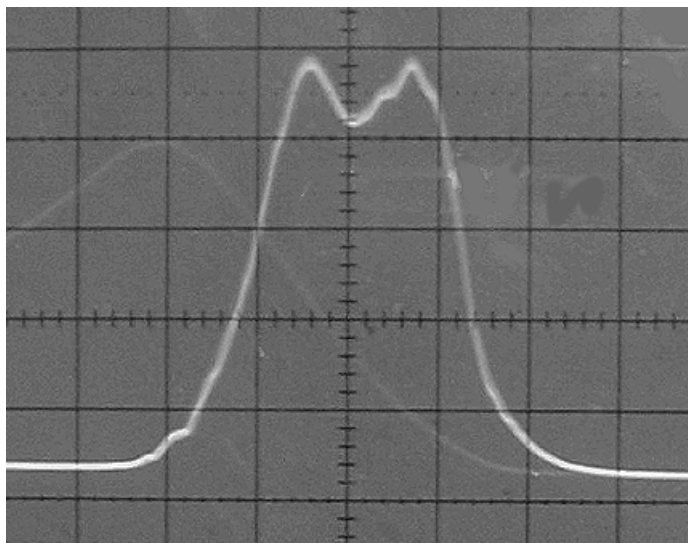


Рис. 5.42. Фото АЧХ двухконтурного полосового фильтра промежуточной частоты

Меняя частоту функционального генератора, можно перемещать кривую АЧХ по оси частот (X). Масштаб оси частот можно менять регулятором SWEEP WIDTH. Регулятор SWEEP RATE позволяет изменять частоту развертки. При низких частотах развертки изображение заметно мигает, при высоких частотах АЧХ — может искажаться. Если ручка этого регулятора выдвинута, то изменение частоты происходит по логарифмическому закону, что часто используется при снятии АЧХ-усилителей и других достаточно широкополосных устройств. Для контроля масштаба частотной оси можно использовать встроенный в функциональный генератор MSG-9810A цифровой частотомер. Для этого достаточно измерить разность частот при сдвиге АЧХ на одно или два деления по горизонтали.

При использовании вместо аналогового осциллографа цифрового можно заметно повысить стабильность представления АЧХ. Поскольку цифровой осциллограф является запоминающим, то он позволяет работать с меньшими частотами развертки функционального генератора, что обеспечивает повышенную точность построения АЧХ и получение стабильного не мерцающего изображения АЧХ (рис. 5.43). Этому способствует и включение режима усреднения, который имеют цифровые осциллографы серии DS-1000.

При соответствующей установке полосы качания можно проводить количественные измерения. Для этого можно также использовать перемещение исследуемой АЧХ

с помощью ручки изменения частоты с контролем последней по показаниям цифрового частотомера. Однако следует отметить, что первичную настройку избирательных устройств на высоких частотах всегда лучше выполнять с помощью генераторов стандартных сигналов с точной установкой частоты.

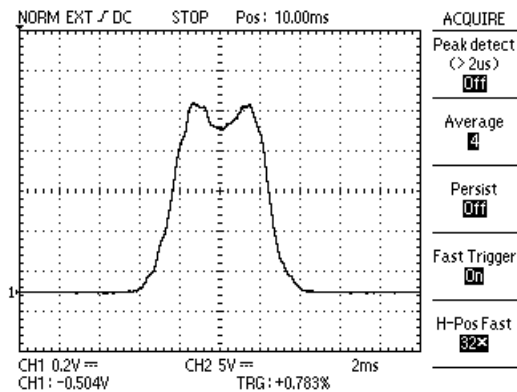


Рис. 5.43. АЧХ двухканального полосового фильтра промежуточной частоты (копия экрана цифрового осциллографа DS-1250)

5.3.7. Исследование линейных цепей

Лаборатория, состоящая из генератора и осциллографа, открывает обширные возможности в исследовании переходных процессов в *линейных цепях*, порой выявляя тонкие закономерности их работы. При этом наличие цифрового осциллографа с достаточной шириной полосы исследуемых частот (до 200 МГц у примененного TDS 2024B) с 2–4 каналами, делает возможным получение до 4 совмещенных осциллограмм, наглядно иллюстрирующих процессы в исследуемых цепях.

На рис. 5.44 показаны осциллограммы выходных сигналов генератора, делителя и напряжения на конденсаторе C контура при прямоугольном входном сигнале (типа меандра) при частоте его 25 кГц. Хорошо виден эффект ударного возбуждения контура при коротких перепадах сигнала генератора (их длительность данного генератора AFG3101 составляет 5 нс).

Наблюдаемые осциллограммы вполне соответствуют обычной трактовке возбуждения затухающих колебаний в последовательном RCL -контуре. Небольшие подозрения возникают при просмотре напряжения на выходе делителя — на фронтах прямоугольных импульсов чуть заметны короткие выбросы. Просто уменьшив масштаб развертки с 5 мкс/дел до 25 нс/дел можно в деталях рассмотреть переходные процессы в области этих выбросов (рис. 5.45).

Тут мы видим нечто "фантастическое"! На второй и на третьей осциллограммах присутствуют высокочастотные колебания с частотой около 120 МГц и с довольно замысловатой формой огибающей. Опытные исследователи сразу догадаются, в чем тут

дело — сказываются неучтенные паразитные малые индуктивности и емкости делителя напряжения, которые создают паразитные резонансные цепи, в которых возбуждаются колебания при воздействии на них перепадов напряжения малой длительности.

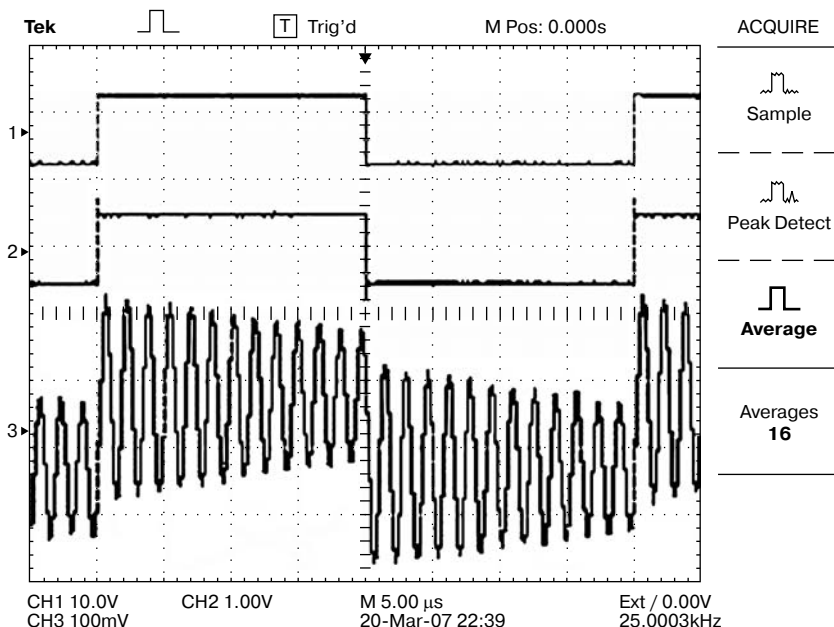


Рис. 5.44. Наблюдение ударного возбуждения последовательного RLC-контура

Возникающую ситуацию можно охарактеризовать поговоркой: "Лучшее — враг хорошего!". Причиной возникновения значительных колебаний является малая длительность перепадов выходного напряжения генератора AFG3101, которая составляет 5 нс. Переключив генератор в режим генерации импульсных сигналов, можно получать импульсы с регулируемой длительностью фронтов. Рис. 5.46 показывает переходные процессы (те же, что на рис. 5.45) при увеличении длительности перепадов до 25 нс. Нетрудно заметить резкое снижение амплитуды паразитных процессов.

Как известно, резонансные цепи могут использоваться для фильтрации сигналов сложной формы путем выделения их гармоник. На рис. 5.47 показан пример фильтрации треугольного напряжения, частота которого взята равно резонансной частоте контура. В связи с этим напряжение на конденсаторе C имеет хорошую синусоидальную форму.

При исследовании фильтрующих цепей и устройств наблюдения формы сигналов на их входе и выходе уже явно недостаточно для оценки их технических характеристик. Например, по виду сигналов на рис. 5.47 явно не определяется состав гармоник входного сигнала и степень их подавления резонансным фильтром. Для определения достаточно снять спектр сигнала (рис. 5.48). Спектр получен цифровым осциллографом TDS 2024B.

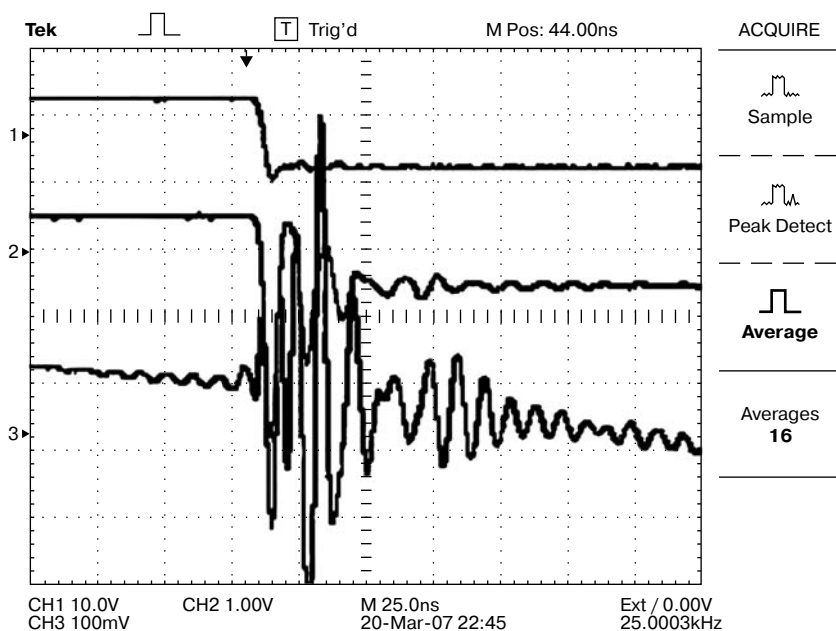


Рис. 5.45. Переходные процессы в области отрицательного среза меандра

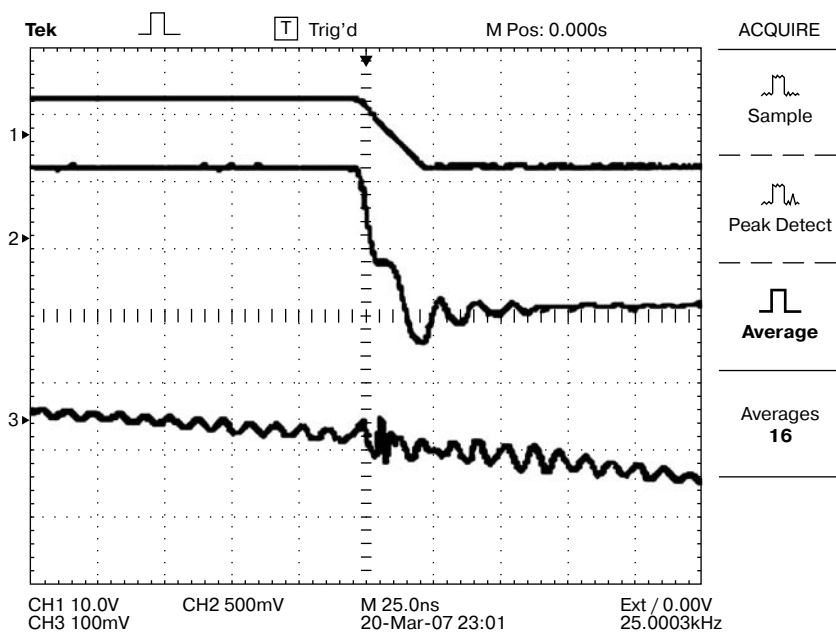


Рис. 5.46. Переходные процессы в области отрицательного среза меандра при увеличении длительности перепада с 5 до 25 нс

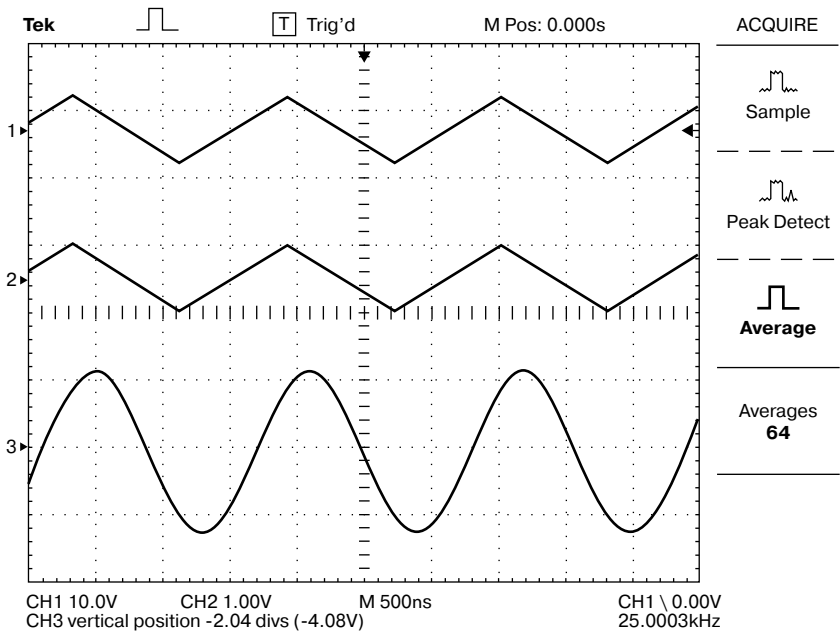


Рис. 5.47. Пример фильтрации треугольного напряжения

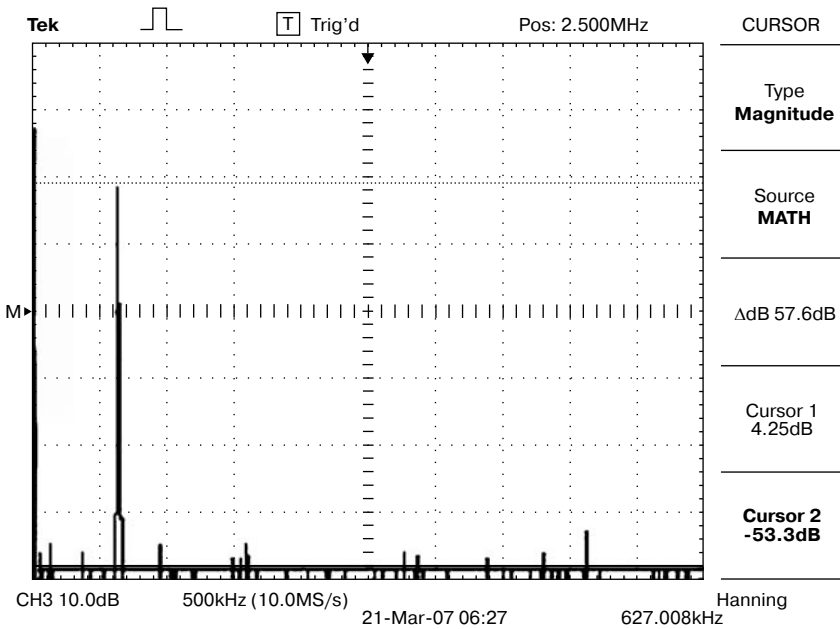


Рис. 5.48. Спектр сигнала, полученного фильтрацией треугольного сигнала

5.3.8. Применение генераторов Tektronix AFG3000 для измерения емкости

Нередко при конструировании электронных устройств возникает необходимость измерить емкость конструктивных элементов устройств или конденсаторов постоянной или переменной емкости. Измерители RCL - параметров или мультиметры, позволяющие измерить емкость, далеко не всегда есть под рукой. К тому же многие из них не позволяют измерять емкости малой величины — порядка единиц, десятков и сотен пФ. А между тем, это необходимо при конструировании радиоприемных и радиопередающих устройств, резонансных контуров, пассивных фильтров и других широко распространенных устройств.

Между тем, лаборатория из приборов корпорации Tektronix позволяет легко осуществить измерение емкости в широком диапазоне ее значений и с достаточно высоким разрешением и с цифровым отсчетом. Ниже мы рассмотрим два простых метода измерения емкости.

Первый способ основан на измерении времени нарастания или спада напряжения на RC -цепи при воздействии на нее импульсов практически прямоугольной формы. Как известно, эти времена при отсчете уровней в 0,1 и в 0,9 от амплитуды определяются соотношением

$$t_n = 2,2RC. \quad (5.6)$$

Если $2,2R=1000$ Ом, то при $C=1000$ пФ получим $t_n=1000$ нс. Таким образом приращение емкости на 1 пФ будет соответствовать 1 нс. Номинал резистора RC -цепи можно выбрать из соотношения $R=1000/2,2=455$ Ом.

Схема измерений представлена на рис. 5.49. Здесь генератор AFG3000 (практически применялся AFG3101) подключается через резистор $R=455$ Ом к входу осциллографа TDS 2024 с применением пробника 1:10. Это обязательное условие, поскольку без пробника (или с пробником 1:1) входная емкость осциллографа существенно возрастает, а полоса частот осциллографа снижается с 200 до 6 МГц. При указанном применении входное сопротивление осциллографа равно 10 МОм и практически не влияет на точность измерений. Входная емкость осциллографа составляет около 13–17 пФ. Измеряемая емкость подключается к входу осциллографа.

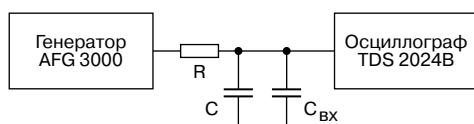


Рис. 5.49. Схема измерения емкости путем измерения времени нарастания импульсов на выходе RC -цепи

Измерение емкости C производится в два этапа. На первом емкость C отключается и производится измерение входной емкости осциллографа $C_{вх}$. Для этого генератор AFG3101 переводится в режим генерации прямоугольных импульсов — меандра. Чтобы уменьшить влияние шумов осциллографа и получить четкие осциллограммы переход-

ных процессов, нужно выбрать амплитуду импульсов порядка нескольких В. Пробник осциллографа нужно освободить от насадки и использовать минимально возможную длину провода заземления — иначе осциллограммы будут искажены звоном из-за паразитной индуктивности земляного провода. На рис. 5.50 показана осциллограмма переходного процесса на этом этапе.

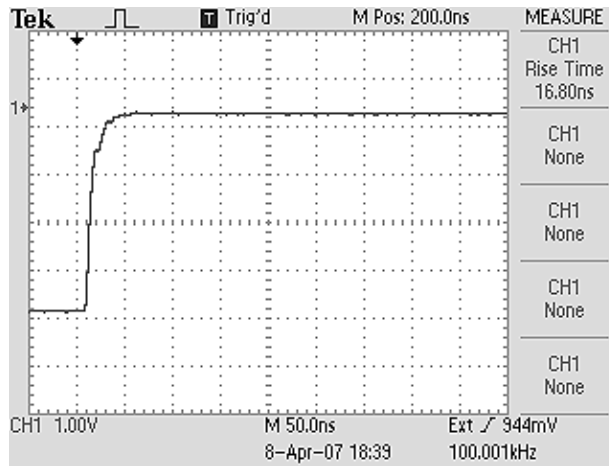


Рис. 5.50. Осциллограмма при измерении входной емкости осциллографа $C_{вх}$

Для измерения времени нарастания перепада (в этом случае, положительной полярности) надо использовать режим автоматических измерений осциллографа. В нашем случае (рис. 5.50) зафиксировано время нарастания 16,8 нс, что означает, что входная емкость равна $C_{вх} = 16,8$ пФ, что соответствует диапазону возможных значений входной емкости, приведенному в технической документации на осциллограф с учетом небольшой емкости монтажа.

На втором этапе параллельно входу подключается измеряемая емкость C и измеряется длительность перепада напряжения при емкости $(C + C_{вх})$ (рис. 5.51). Здесь для примера измерялась емкость слюдяного конденсатора с номиналом 100 пФ с разбросом $\pm 10\%$. Из осциллограммы видно, что время нарастания перепада составило 112,4 нс, следовательно, $(C + C_{вх}) = 112,4$ пФ, а измеренное значение емкости равно $(112,4 - 16,8) = 95,6$ пФ.

Погрешность измерения емкости этим способом определяется погрешностью номинала резистора R и погрешностью измерения времени нарастания перепада цифровым осциллографом. Погрешность номинала резистора легко свести к очень малой величине, подобрав (с помощью мультиметра) резистор с достаточно точным номиналом в 455 Ом. Тогда погрешность измерения будет определяться погрешностью автоматического измерения длительности перепада цифровым осциллографом. Обычно она не превышает 2–3%. Разумеется, что помимо цифрового осциллографа серии TDS 2000В может использоваться любой другой цифровой осциллограф с полосой частот не менее 200 МГц.

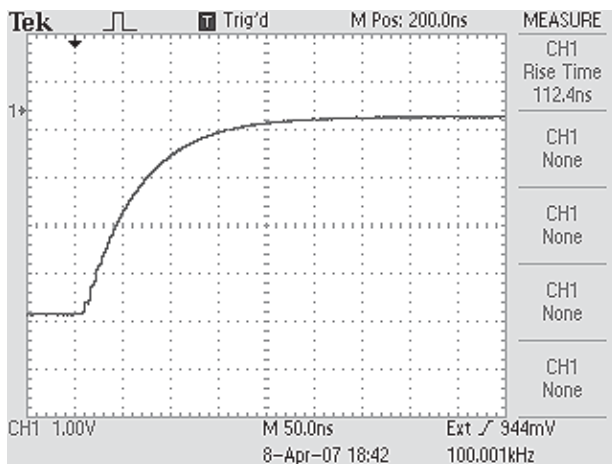


Рис. 5.51. Осциллограмма при измерении емкости осциллографа $C+C_{ex}$

Достоинством данного метода является совмещение измерений с просмотром осциллограмм переходных процессов. Нередко это выявляет недостатки конденсаторов, например, нелинейность емкости, наличие значительной паразитной индуктивности и возникновение резонанса при параллельном включении конденсаторов.

Другой метод измерения емкости основан на измерении тока заряда или разряда конденсатора при подключении его к источнику импульсов прямоугольной формы. Схема измерения представлена на рис. 5.52. Генератор серии AFG3000 используется как генератор симметричных прямоугольных импульсов (меандра) с заданной частотой f . Измеряемая емкость заряжается через диод Д1 и миллиамперметр, а разряжается через диод Д2.

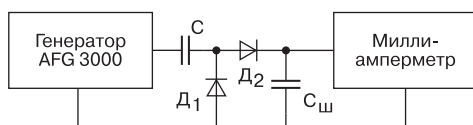


Рис. 5.52. Измерительная схема для измерения емкости методом заряда-разряда

Средний ток заряда (и разряда) емкости в данном случае равен

$$I = C\Delta Uf, \quad (5.7)$$

где ΔU перепад входного напряжения при заряде и разряде C . При $C=1000$ пФ, $\Delta U=10$ В и $f=100$ кГц получим $I=1$ мА. Таким образом, применяя цифровой или аналоговый миллиамперметр, получим при разрешении по току 1 мкА при разрешении по емкости в 1 пФ. В эксперименте использовался мультиметр YF-3700. Минимальный предел измерения тока у него равен 4 мА. В этом случае при $\Delta U=10$ В можно реализовать пределы измерения емкости, указанные в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Пределы измерения емкости

Частота AFG3101	Предел C, пФ	Разрешение C, пФ
10 МГц	40	0.01
1 МГц	400	0.1
100 кГц	4000	1
10 кГц	40000	10
1 кГц	400000	100

Поскольку частота f задается в генераторах с высочайшей точностью (нестабильность менее 10^{-6} в течение года работы), то основными причинами погрешности при измерениях является неточность установки перепада напряжения ΔU и погрешность самого измерителя тока. Последняя при использовании цифровых приборов мала — даже у дешевых мультиметров она меньше 0,5%. Погрешность установки уровней меандра у генераторов AFG3101 составляет $\pm 1\%$, т. е. тоже достаточно мала. Это позволяет считать основной погрешность от неидеальности диодов. Без калибровки измерительной схемы погрешность может достигать 2–3% при использовании маломощных германиевых диодов с малым остаточным напряжением (до 0,2–0,3 В).

Заметим, что возможна простая калибровка измерительной схемы. Для этого достаточно откалибровать ее с помощью конденсатора с малой погрешностью емкости с номиналом, равным верхнему пределу измерений на заданном диапазоне. Коррекцию можно производить как уточнением амплитуды меандра, так и частоты.

5.3.9. Контроль динамики интегральных микросхем

Многие аналоговые интегральные схемы, например, интегральные операционные усилители (ОУ) или интегральные компараторы, часто используются в импульсных режимах работы. Это означает необходимость в контроле динамики интегральных микросхем, т. е. временных диаграмм их работы.

Типичная схема их испытания представлена на рис. 5.53. В зависимости от динамических параметров исследуемых микросхем (прежде всего времен переключения в нелинейном режиме) может использоваться тот или иной тип генератора импульсов (сигналов) и осциллографа (см. табл. 5.2).

Делителем $R1$ и $R2$ выставляется порог переключения. Амплитуда входного импульса от генератора обычно должна превышать порог. Осциллограф позволяет наблюдать как входной импульс, так и импульс с выхода микросхемы, и путем их сравнения определять характер динамических процессов переключения испытываемой микросхемы. Современный цифровой осциллограф позволяет не только наблюдать формы входного и выходного сигналов, но и (в режиме курсорных или автоматических измерений) оценивать ряд характерных параметров:

- времена задержки переключения (переднего и заднего фронтов);

- длительности фронтов (времена переключения) и их зависимость от амплитуды и длительности фронтов входного импульса;
- появление искажений, например, звона выходных импульсов;
- сбои в работе микросхемы;
- влияние резистивной и емкостной нагрузки на работу микросхемы и др.

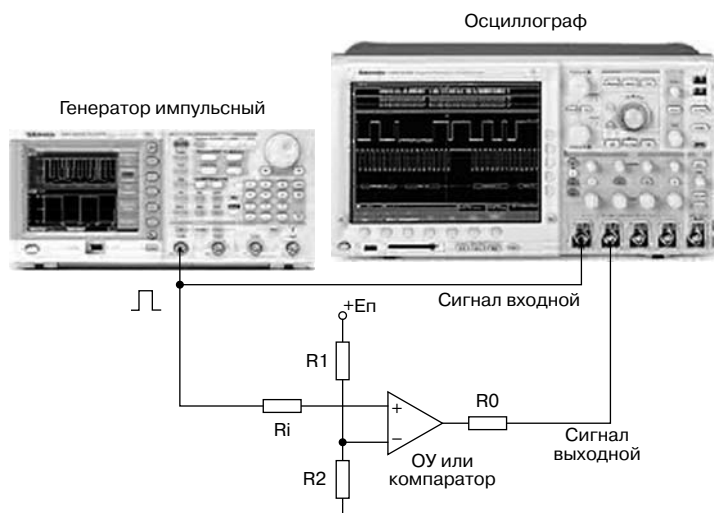


Рис. 5.53. *Схема контроля динамики аналоговых интегральных микросхем*

На рис. 5.54 показаны типичные осциллограммы входного импульса 1 и выходного импульса 2 от микросхемы аналогового компаратора. В данном случае работа микросхемы происходит очень четко — заметна лишь задержка выходного импульса относительно входного. Фронты выходного импульса немного растянуты, что говорит о хорошем выборе входного импульса.

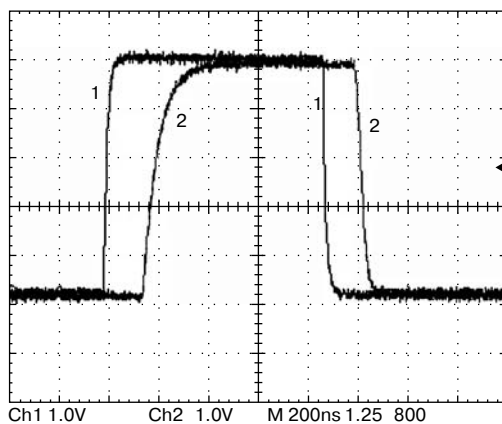


Рис. 5.54. *Осциллограммы импульсов переключения интегрального компаратора*

При испытании операционных усилителей они обычно включаются с введением отрицательной обратной связи — для этого резистор R1 в схеме на рис. 5.53 отключается от источника +Еп и подключается к выходу микросхемы. Для испытания ОУ желательно применение генераторов (например, серии AFG3000) с регулируемой длительностью фронтов. Их регулировка позволяет найти такие параметры входного импульса, при которых возможна нестабильность переключения ОУ (пример этого показан на рис. 5.55). Здесь на переднем и заднем фронтах выходного импульса 2 отчетливо видны характерные колебания, которые исчезают при уменьшении длительности фронтов входного импульса 1.

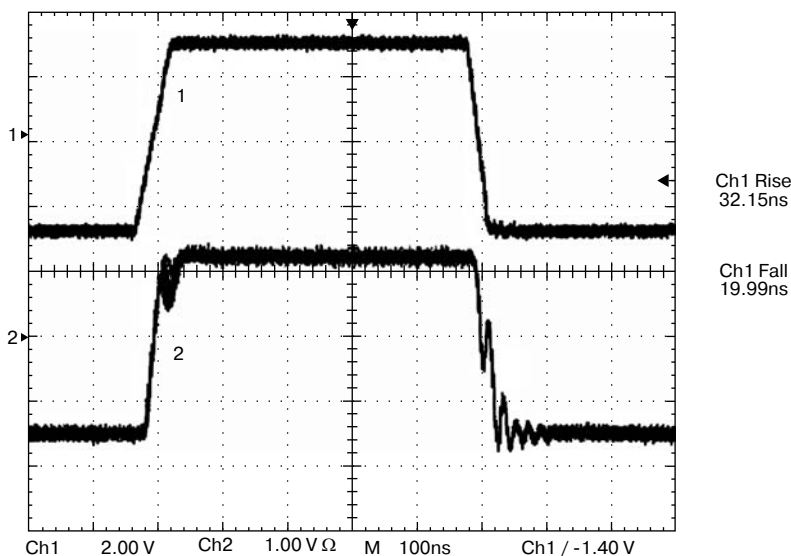


Рис. 5.55. Осциллограммы импульсов на входе и выходе интегрального ОУ

Схема рис. 5.53 позволяет детально исследовать работу интегральных ОУ и компараторов в самых различных режимах (линейном, нелинейном, с различным превышением порогов переключения и т.д.) и получить важную информацию об этих режимах и зонах работоспособности микросхем. Следует учитывать, что наряду с обычными ОУ и компараторами умеренного быстродействия сейчас выпускаются эти микросхемы с задержками переключения и фронтами с длительностью менее 1 нс. Для них нужны генераторы с субнаносекундными временами нарастания и спада, например AWG4000 компании Tektronix.

5.3.10. Контроль индикаторной панели

Двухканальные генераторы произвольных функций, например AFG3252, можно использовать для тестирования различных устройств, требующих сигналы времени и сиг-

налы различной, часто нестандартной, формы. На рис. 5.56 представлена схема *тестирования индикаторной панели*. Панель требует подачи импульсов времени и специальных пачек импульсов, задающих отображения того или иного символа.

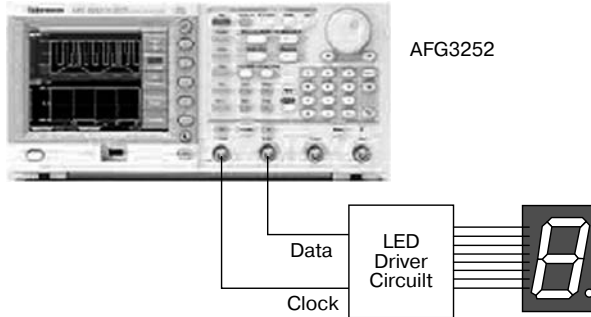


Рис. 5.56. Тестирование индикаторной панели

Индикатор управляется схемой драйвера, которая преобразует последовательный периодически повторяющийся код импульсов в сигналы управления индикатором, передаваемые по параллельной шине.

5.3.11. Контроль режима XY осциллографов

Большинство аналоговых и цифровых осциллографов имеет *режим XY*, при котором на экране осциллографа отображается кривая или фигура, получаемая при подаче на входы Y и X отдельно сигналов. Наиболее известно построение таким образом фигур Лиссажу, при которых сигналы имеют синусоидальную форму и кратную частоту (не обязательна кратность в целое число раз).

Для проверки режима XY идеально подходят двухканальные генераторы произвольных функций, например, AFG3152. На рис. 5.57 показан пример проверки режима XY цифрового осциллографа DPO7000.

5.4. Специальные применения генераторов сигналов

5.4.1. Проверка чувствительности радиоприемников

Проверка чувствительности радиоприемников — одна из широко распространенных областей применения генераторов сигналов — в основном, синусоидальных с амплитудной и частотной модуляцией. Далеко не каждый современный генератор сигналов годится для решения этой задачи, поскольку нередко уровень его сигнала нельзя сделать достаточно малым, а степень экранировки приборов недостаточна для работы с

сигналами низкого уровня — порядка долей-единиц мкВ. В частности, популярные генераторы AFG3000 для этой цели пригодны мало.

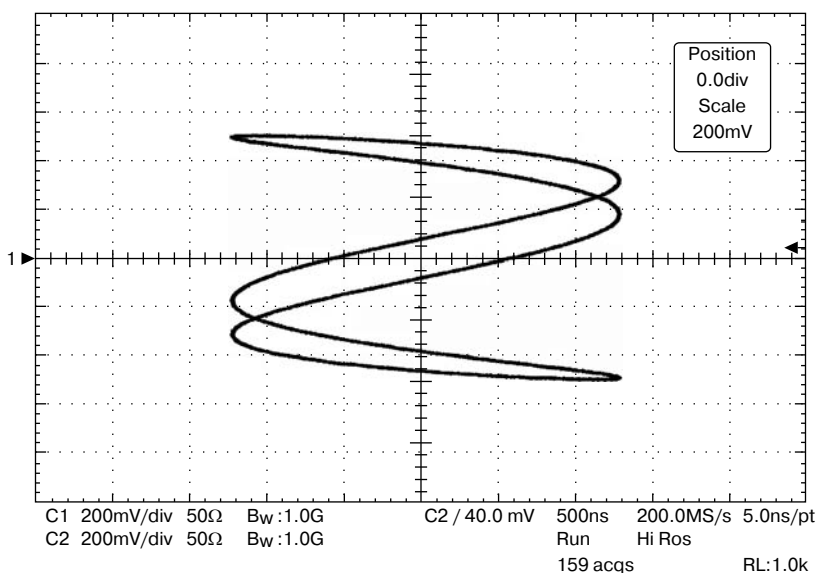


Рис. 5.57. Пример проверки режима XY цифрового осциллографа DPO7000

Тем не менее, есть много промышленных моделей генераторов стандартных сигналов, вполне пригодных и предназначенных для проверки чувствительности радиоприемных устройств с амплитудной модуляцией. Основным параметром (помимо частотного диапазона и вида модуляции) является минимальный уровень выходного напряжения. Обязательно наличие аттенюатора с достаточно большим ослаблением сигнала — до 80–100 дБ. Нестабильность частоты применяемого генератора стандартных сигналов должна быть в несколько раз меньше, чем нестабильность частоты гетеродина радиоприемника. Генератор должен предусматривать модуляцию соответствующего исследуемому радиоприемнику типа.

Функциональная схема для измерений предельно проста — выход генератора подключается к антенному входу радиоприемника, а к выходу радиоприемника подключается нагрузка (например, головные телефоны) и низкочастотный измеритель выходного напряжения, например милливольтметр средних или среднеквадратичных значений напряжения.

Чувствительность определяется как минимальное напряжение на выходе генератора (с заданным коэффициентом модуляции и частотой), которое удовлетворяет двум условиям: выходное напряжение равно заданному значению и отношение сигнал/шум соответствует норме. Для измерения шума достаточно отключить модуляцию. Обычно приходится провести несколько замеров, прежде чем оба условия будут выполнены.

Степень экранировки генератора сигнала можно проверить, отключив соединительный ВЧ-кабель и установив на выход генератора заглушку. Меняя частоту генератора в окрестности частоты настройки приемника, можно оценить, насколько радиоприемник принимает излучаемый генератором сигнал. Допустим, уровень такого сигнала в несколько раз меньше чувствительности радиоприемника.

Аналогично выполняется контроль чувствительности радиоприемников с частотной модуляцией. Для других типов радиоприемников есть свои методики проверки чувствительности, их и надо применять.

5.4.2. Создание сигнала с кодоимпульсной модуляцией

Типичным примером применения генераторов серии AFG3000 является создание *кодоимпульсных модуляторов*. Наиболее распространенным способом кодоимпульсной модуляции является управление фазой синусоидального сигнала генератора [115]. Например, для передачи четырех логических состояний можно использовать четыре значения фазы (см. табл. 5.5).

Таблица 5.5. Пример кодирования логических состояний фазой

Логическое состояние	Амплитуда	Фаза
00	1	45°
01	1	135°
10	1	315°
11	1	225°

В соответствии с векторным представлением синусоидальных сигналов (см. раздел 1.9.5 и рис. 1.47 и 1.48) этот вид модуляции можно представить диаграммой, показанной на рис. 5.58. При этом каждому логическому состоянию соответствует точка на окружности, соответствующей положению конца радиус-вектора синусоидального сигнала.

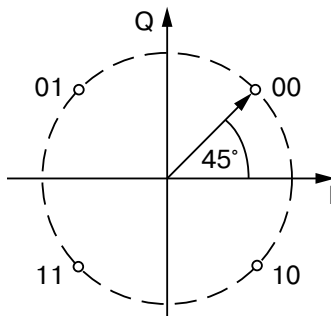


Рис. 5.58. Диаграмма модуляции QPSK с изменением фазы

Такое представление кодоимпульсной модуляции не является единственным. Другим примером кодирования логических состояний является кодирование путем изменения I и Q составляющих модулированного сигнала (см. табл. 5.6).

Таблица 5.6. Пример кодирования логических состояний фазой

Логическое состояние	Амплитуда I	Амплитуда Q
00	$+\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$
01	$-\sqrt{2}$	$+\sqrt{2}$
10	$+\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$
11	$-\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$

Этому варианту соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 5.59.

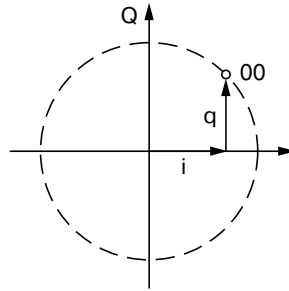


Рис. 5.59. Диаграмма модуляции QPSK с амплитуды составляющих I и Q сигнала

Типичная схема модулятора для системы с QPSK модуляцией представлена на рис. 5.60. Высокочастотная несущая подается на вход LO и через усилитель поступает на фазовращатель. Сигналы I+ и I-, а также Q+ и Q- поступают по дифференциальным входам на умножители, а сигналы с выхода последних суммируются, что и создает радиочастотный сигнал RF(t).

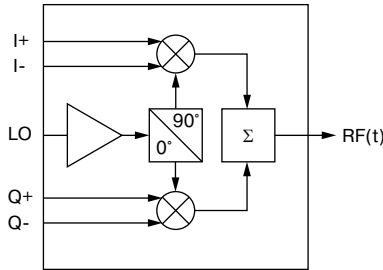


Рис. 5.60. Модулятор для осуществления модуляции QPSK

Полная функциональная схема для получения сигнала с QPSK модуляцией представлена на рис. 5.61. Основой ее являются два генератора — высокочастотный Signal Generator для создания несущей частоты и генератор модулирующего сигнала с двумя каналами для I и Q составляющих. Наиболее подходящим для этого является двухка-

нальный генератор серии AFG3000. Поскольку выходы генератора дают несимметричные сигналы, их нужно преобразовать в симметричные дифференциальные сигналы.

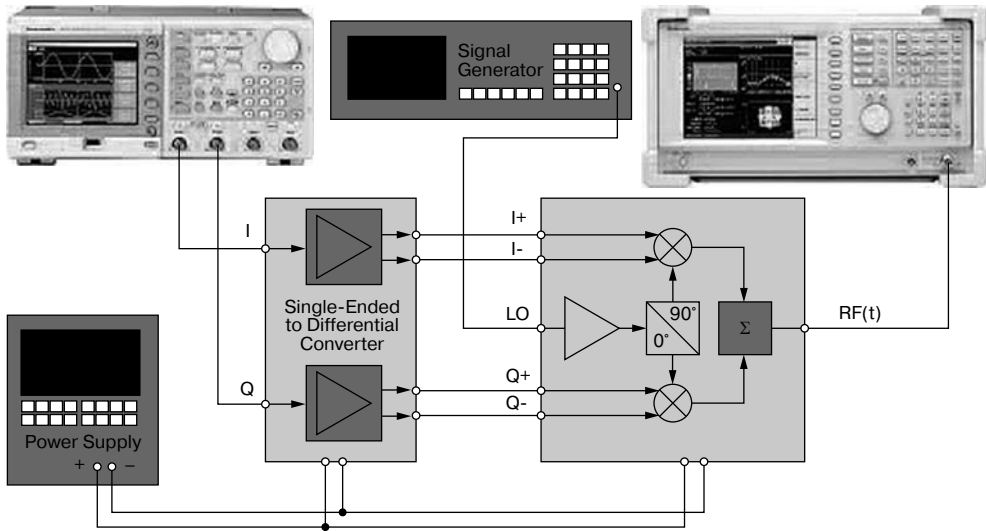


Рис. 5.61. Функциональная схема модели передатчика с QPSK модуляцией

Для формирования сигнала с частотой модуляции, например, 1 МГц, надо задать у двух каналов генератора AFG3000 режим непрерывной генерации синусоидального напряжения с этой частотой и с одинаковой амплитудой в 0,5 В. Фазовый угол в каналах надо установить равным 0° в первом канале и 90° во втором канале. Вид окна генератора AFG3152 с графиками моделирующих сигналов показан на рис. 5.62.

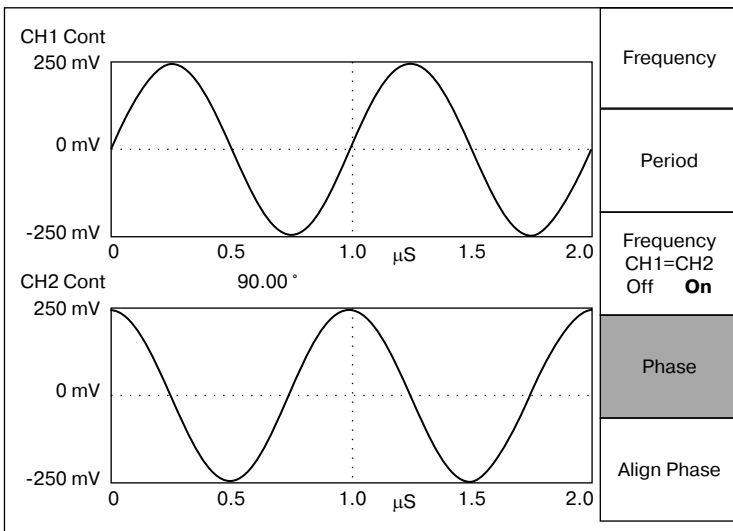


Рис. 5.62. Вид окна генератора AFG3152 с графиками модулирующих сигналов

Частоту радиочастотного генератора можно задать равной 2,5 ГГц. Для контроля выходного сигнала модели передатчика (рис. 5.60) наиболее подходит анализатор спектра радиочастот. На рис. 5.63 показан реальный спектр модели передатчика с QPSK модуляцией. Отчетливо видны пик несущей частоты и боковые частоты. Нетрудно оценить мощность каждой составляющей сигнала.

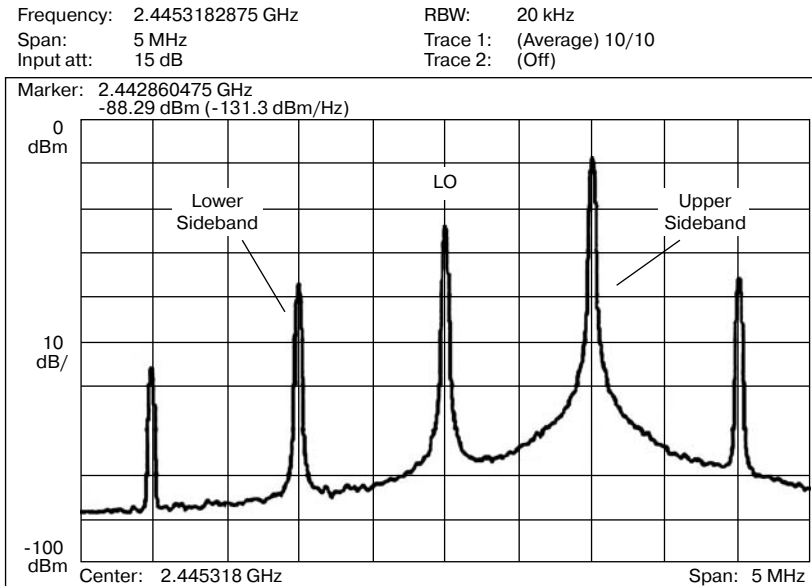


Рис. 5.63. Спектр радиосигнала с QPSK модуляцией

Меняя частоту модуляции, можно снять частотную характеристику модуляционного тракта. Она представлена на рис. 5.64. Спад этой характеристики на 3 дБм происходит примерно на частоте 45 МГц, что говорит о достаточно большой широкополосности канала связи с такой модуляцией.

5.4.3. Контроль импульсных сигналов с помощью глазковых диаграмм

Для сильно зашумленных импульсных сигналов довольно эффективным (и эффективным) методом контроля импульсных сигналов являются *глазковые диаграммы* [116-119]. В простейшем случае они строятся выводом на экран дисплея цифрового осциллографа зашумленного или нестабильного импульсного сигнала и того же сигнала, инвертированного по фазе. Вырезки сигнала берутся в различные моменты времени с синхронизацией по переднему фронту (см. рис. 5.65).

Полученный таким образом сигнал на промежутке каждого периода напоминает открытый глаз (рис. 5.66), откуда и название этого вида диаграмм. Получение таких диаграмм возможно при выводе множества осциллограмм, и потому предполагает

применение запоминающего осциллографа. Наиболее эффектный вид имеют глазковые диаграммы, получаемые с применением технологии цифрового фосфора, что характерно для многих запоминающих осциллографов компании Tektronix.

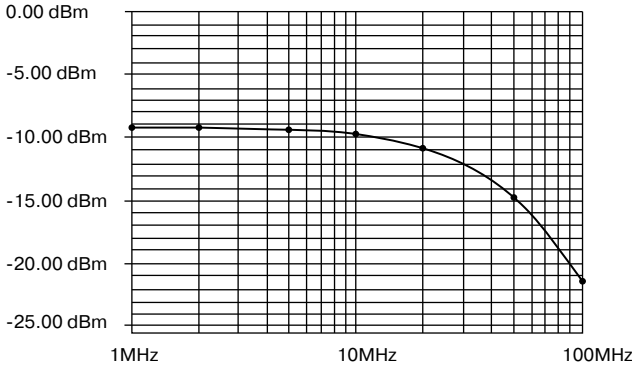


Рис. 5.64. Частотная характеристика модуляционного тракта

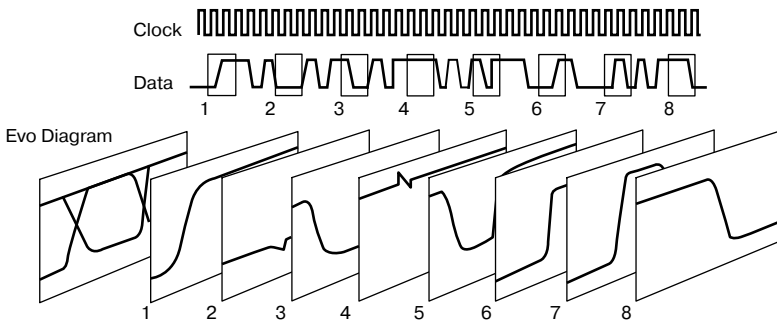


Рис. 5.65. Принцип построения глазковой диаграммы

Современные генераторы сигналов произвольной формы позволяют на импульсный сигнал накладывать сигнал шума. Такой сигнал позволяет проверить способность осциллографа строить качественные глазковые диаграммы. В свою очередь, многие современные осциллографы способны создавать внутри глазковой диаграммы специальную маску — она видна на рис. 5.66 в виде серого многоугольника. Эта маска задает область недопустимых значений параметров сигнала. Если глазковая диаграмма входит в область маски, то сообщается о выходе параметров импульсов за допустимые пределы. При работе с глазковыми диаграммами возможны курсорные измерения (на рис 5.66 показан пример измерений таким образом активной длительности импульсов).

Возможно также построение осциллограмм с входа и выхода исследуемого устройства. Многоканальные осциллографы позволяют строить несколько глазковых диаграмм. Обычно средние перепады входного и выходного сигналов нормируются по амплитуде. Существуют различные типы глазковых диаграмм. Красочные глазковые диаграммы

строит система компьютерной математики MATLAB, часто используемая для обработки и наглядного представления сигналов.

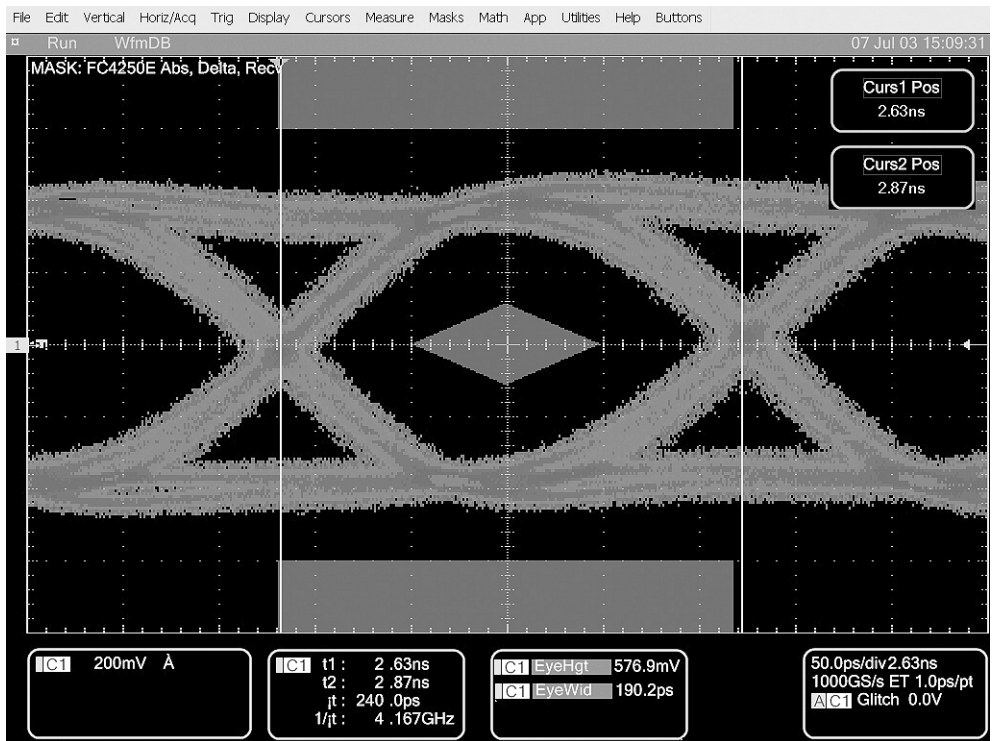


Рис. 5.66. Глазковая диаграмма

5.4.4. Контроль за деградацией сигнала при его передаче по каналам связи

На рис. 5.67 показан типичный пример контроля кодоимпульсной (например, кабельной или световолоконной) линии передачи с применением техники построения глазковых диаграмм. При четком разделении импульсов и их фронтах получается глазковая диаграмма в виде "открытого глаза" — А. Искажения импульсов, в частности, дрожание фронтов (*джиттер* [122]) и уровней сигнала ведет к постепенному "закрыванию глаза" — диаграммы В и С, что существенно затрудняет четкое опознание сигнала приемником.

Следует обратить внимание на то, что *деградация сигнала* в процессе его распространения по каналу связи происходит как вследствие уменьшения амплитуды сигнала, так и вследствие увеличения шума в сигнале. Так что рано или поздно сигнал деградирует настолько, что его характерные уровни становится невозможно различить.

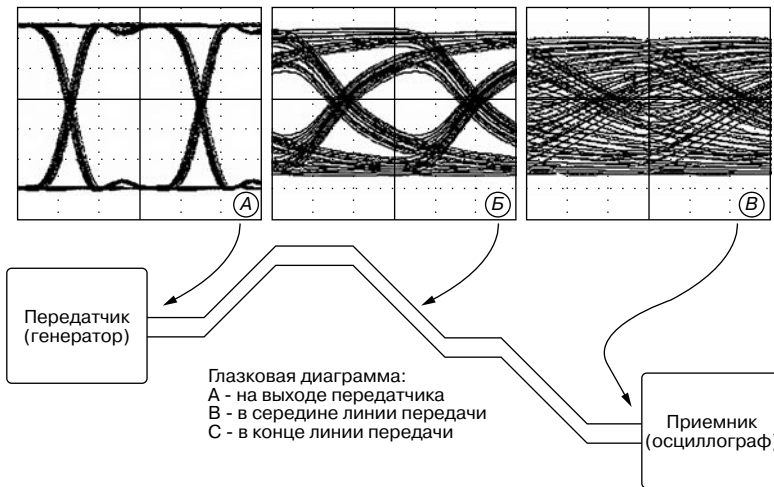


Рис. 5.67. Контроль за деградацией сигнала при испытании кодоимпульсной линии передачи

5.4.5. Контроль ультраширокополосных систем

В последнее время довольно широкое распространение получили связанные, радиолокационные и телекоммуникационные системы с очень широкой полосой частот, намного превосходящей полосу частот сигналов с амплитудной, частотной, фазовой и даже кодоимпульсной модуляцией.

В разное время такие системы именовались по-разному: видеоимпульсные системы и локаторы, сверхширокополосные и импульсные системы связи, системы связи с шумоподобными сигналами и т. д. В последнее время их стали называть *ультраширокополосными системами* — *UWB* (Ultra Wide Bandwidth) [118, 119]. Принято относить к ультраширокополосным системам системы, у которых относительная полоса частот выбирается из условия (см. рис. 5.68):

$$FB = \frac{F_H - F_L}{\left(\frac{F_H + F_L}{2}\right)} = 0,2 \text{ или } 20\%. \quad (5.8)$$

Таким образом, как следует из (5.8), к UWB-системам относятся системы, сигналы которых занимают полосу частот не менее 20% от средней частоты. Известно, что емкость передаваемой информации определяется выражением:

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (5.9)$$

где S выражается в бит/с, W — радиочастотная полоса частот (в ГГц), S/N — отношение сигнал/шум. Из (5.9) вытекает, что S пропорциональна радиочастотной полосе частот W .

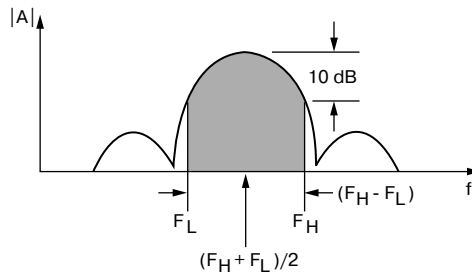


Рис. 5.68. Спектр UWB-систем

Ближе всего к ультраширокополосным системам связи находятся системы связи с кодоимпульсной модуляцией. При этом более сложные системы обеспечивают более экономное использование спектра и большее отношение сигнал/шум. Это наглядно иллюстрирует рис. 5.69.

Очевидно, однако, что для увеличения количества передаваемой информации есть основной путь в виде расширения радиочастотной полосы частот и отказа от синусоидальной несущей и синусоидальных боковых полос. Иными словами, для передачи информации необходимо использовать импульсные сигналы малой длительности. Используются самые различные импульсы, например, экспоненциальные, гауссовские, гаверсинуса, вырезки шумового сигнала и т. д. Такие сигналы создают некоторые из описанных в главе 4 импульсных генераторов. И их применение для этого является новым и актуальным.

Системы UWB работают в диапазоне частот от нескольких ГГц и выше, так что полоса частот их спектра нередко составляет многие гигагерцы. Очевидно, что для ультраширокополосных сигналов просто невозможно найти уже не занятую область спектра электромагнитных колебаний. Однако, к счастью, принципы построения ультраширокополосных систем связи позволяют таким системам "сосуществовать" с обычными узкополосными сигналами, как бы игнорируя их и не сильно мешая обычным системам связи. Это обстоятельство обеспечивает высокую скрытность ультраширокополосных систем связи и их хорошую защиту от помех, причем как узкополосных, так и широкополосных.

Чтобы UWB-системы не мешали работе обычным радиосистемам, мощность их передатчиков должна быть мала и находиться на уровне, чуть большем уровня тепловых шумов. В свою очередь, широкая полоса спектра UWB-систем обеспечивает их защиту от мощных узкополосных помех. Последние способны "вырубить" отдельные участки спектра UWB-систем, но это ведет к малым потерям информации.

В UWB используются специальные виды модуляции:

- TH-UBW — псевдослучайная перестройка во времени.
- DS-UBW — прямая последовательность.

- MB-OFDM — многдиапазонное мультиплексирование с ортогональным разделением каналов.

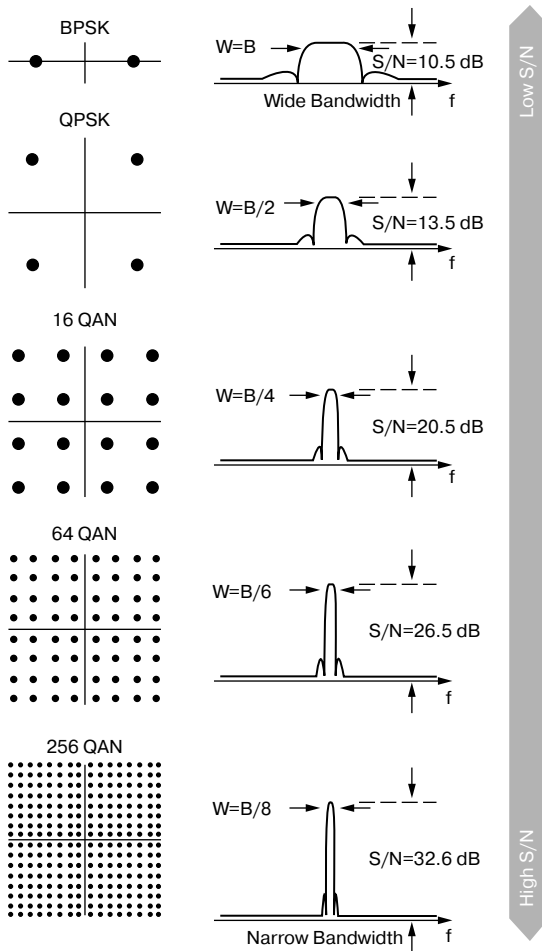


Рис. 5.69. Диаграммы различных видов кодоимпульсной модуляции и их спектры

Последний вид модуляции был выбран компаниями альянса WiMedia для передачи мультимедийной информации. Сигнал передатчика при этом получается путем мультиплексирования 128 ортогональных частотно разделенных несущих, причем для каждой несущей используется квадратурная фазовая манипуляция QPSK либо двойная модуляция DCM. Уже достигнуты скорости передачи информации 0,48 Гбит/с, а в отдельных случаях до 1 Гбит/с.

Высокая пропускная способность UBW-каналов связи, их малая чувствительность к шумам и помехам, малая зависимость от многолучевого распространения сигналов и замираний делает системы UBW идеальными системами для беспроводной связи пери-

ферийного оборудования с компьютерами, ближней радиолокации, подповерхностной локации и георадаров, для устройств обнаружения и опознавания предметов, замурованных в стенах строений, и в закрытых помещениях. Аппаратная реализация UBW-систем достаточно проста и реализуется средствами микроэлектроники.

Однако эти достоинства UBW-систем оборачиваются техническими проблемами в реализации их тестирования и отладки. Диапазон временных параметров импульсов, в частности, их субнаносекундная длительность и сверхвысокие частоты повторения, сильно ограничивает число генераторов и осциллографов, которые могут применяться для создания UBW-сигналов с указанными выше типами модуляции и просмотра формы импульсов.

Наиболее пригодны для испытания и отладки UBW-устройств и систем являются генераторы произвольных функций серии AWG7000 и цифровые осциллографы серии DPO7000/70000 и DSA70000. При этом наилучшим образом подходят генераторы с частотой дискретизации 20 ГГц и осциллографы с частотой дискретизации 50 ГГц. Все это наиболее дорогие из такого рода приборов на рынке. Внешний вид приборов для рабочего места испытания и тестирования UBW-устройств представлен на рис. 5.70.



Рис. 5.70. Приборы на рабочем месте испытания и тестирования UBW-устройств

Интересно отметить, что роль наиболее совершенных и дорогих анализаторов спектров реального времени в испытании UBW-систем довольно ограничена. Причиной этого является ограниченная полоса (до 60 МГц) частот, которая просматривается такими анализаторами. В тоже время возрастает роль анализаторов спектра других фирм, например RHNDE&SCHWARZ, которые имеют более широкую полосу просмотра и более высокие максимальные частоты спектрального анализа. Заметно возрастает роль спектрального анализа и с помощью цифровых осциллографов — у них часто нет больших ограничений на полосу частот просмотра спектров.

5.4.6. Генератор R&S SMA100A как средство контроля аэронавигационных систем

Современные аэропорты оснащены рядом аэронавигационных систем, обеспечивающих безопасность полетов вблизи их посадки и взлета самолетов [121]. Некоторые из этих систем являются новыми, а некоторые применяются уже много лет, поскольку давно показали свою полезность и эффективность.

Всенаправленные радиомаяки VOR работают в диапазоне частот от 108 МГц до 117,95 МГц. По сигналам этих радиомаяков, расположенных по трассе полета, летчики определяют положение самолетов. Эти радиомаяки обеспечивают возможность автоматической прокладки курса. *Системы ILS* используются при заходе на посадку и при посадке на взлетно-посадочную полосу. Они информируют летчика об отклонении по курсу и глиссаде, что необходимо при обеспечении посадки в любых погодных условиях. *Курсовой посадочный радиомаяк LOC* сообщает пилоту об отклонении от стандартной траектории по курсу, он работает на частотах 108,1 до 111,95 МГц. *Глиссадный радиомаяк GS*, работающий на частотах от 329 до 335 МГц, позволяет оценивать отклонение от глиссады. Три *маркерных радиомаяка* с излучаемыми частотами от 74,6 до 75,4 МГц располагаются на удалении 7200, 1050 и 300 м от начала взлетно-посадочной полосы. Они позволяют контролировать высоту полета при посадке. Для маршрутной навигации до сих пор применяются *автоматические радиопеленгаторы (ADF)* предыдущего поколения. Они определяют направление на всенаправленные радиомаяки NDV, работающие в диапазоне частот от 190 кГц до 1,75 МГц.

Таким образом, аэропорты и аэродромы имеют приличное радиохозяйство, требующее систематического контроля и тестирования. Широкий диапазон частот указанных аэронавигационных средств и разнообразие типов сигналов в настоящее время не являются препятствием для осуществления службы контроля за этими средствами. Более того, некоторые генераторы сигналов, например R&S SMA100A (см. раздел 1.9.3), имеют опцию SMA-K25, которая обеспечивает генерацию всех необходимых сигналов для проверки радиоприемных устройств аэронавигационных систем.

Опция SMA-K25 обеспечивает:

- Четыре режима генерации тестовых сигналов VOR: нормальный, перестраиваемый, поднесущая, поднесущая+ЧМ.

- Три режима генерации тестовых сигналов ILS: нормальный, 90 Гц и 150 Гц.
- Импульсные сигналы маркерных маяков согласно Приложению 10 к стандарту ICAO.
- Разность фаз сигналов VOR, являющаяся прямой мерой азимута радиомаяка относительно направления на север, заданная с разрешением в $0,01^\circ$.
- Разность глубины модуляции (DDM) сигналов ILS с разрешением 10^{-4} .
- Изменение глубины АМ с шагом $0,1\%$.
- Разрешение по частоте для всех сигналов $0,1$ Гц.
- Добавление позывного COM/ID в международном коде Морзе.
- Возможность добавления внешнего АМ-сигнала помехи.

Таким образом, указанные генераторы обеспечивают полный набор текстовых сигналов для радионавигационных систем.

Литература

1. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
2. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
3. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.
4. Шумский И. А. Основные направления развития современной осциллографии: "гонка" новых технологий на гигагерцовой дистанции. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2003, № 5.
5. Дьяконов В. П. Стробоскопические осциллографы у барьера в 100 ГГц. Ремонт и сервис, 2005, № 12.
6. Измерения в электронике. Справочник/Кол. авторов под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Рябинин Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование. М.: Советское радио, 1972.
8. Ноткин М. Р. Функциональные генераторы и их применение. М.: Энергия, 1981.
9. Келехсаев Б. Г. Нелинейные преобразователи и их применение. Справочник. М.: Солон-Р, 1999.
10. Шило В. Л. Функциональные аналоговые интегральные микросхемы. М.: Радио и связь, 1982.
11. Коломбет Е. А. Таймеры. М.: Радио и связь, 1983.
12. Иццоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства. М.: Советское радио, 1972.

13. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. М.: Советское радио, 1964.
14. Еремин С. А., Мокеев О. К., Носов Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда. М.: Советское радио, 1966.
15. Гольденберг Л. М. Импульсные и цифровые устройства. М.: Связь, 1973.
16. Справочник по микроэлектронной импульсной технике/В. Н. Яковлев, В. В. Воскресенский, С. И. Мирошниченко и др. К.: Техника, 1983.
17. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник/В. В. Бачурин, В. Я. Ваксембург, В. П. Дьяконов, А. А. Максимчук, В. Ю. Смердов и А. М. Ремнев. Под ред. В. П. Дьяконова. М.: Радио и связь, 1994.
18. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Смердов В. Ю., Ремнев А. М. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-Р, 2002.
19. Гаряинов С. А., Абезгауз И. Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970.
20. Н. Филинюк. Негатроника. Исторический обзор. <http://www.n-t.ru/tp/in/nt.htm>.
21. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Советское радио, 1973.
22. Двухбазовые диоды в автоматике/А. Е. Ольсевич и др. М.: Энергия, 1972.
23. Недолужко И. Г., Сергиенко Е. Ф. Однопереходные транзисторы. М.: Энергия, 1974.
24. Ерофеева И. А. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах. М.: Связь, 1974.
25. Wikipedia. The Free Encyclopedia. Avalanche transistor (en.wikipedia.org/wiki/Avalanche_transistor), 1.01.2007.
26. Дьяконов В. П. Вольт-амперная характеристика транзистора в лавинном режиме//Радиотехника и электроника, 1968, № 5.
27. Кузнецов Ю. А., Каменецкий Ю. А., Смутьский А. С. Германиевый лавинный транзистор ГТ338.//Электронная промышленность, 1971, № 4.
28. Лавинный транзистор и его использование в схемотехнике. Дьяконов В. П., Босый В. И., Кузнецов Ю. А. и др. В кн. "Полупроводниковые приборы в технике электросвязи"//Под ред. И. Ф. Николаевского. М.: Связь, вып. 9, 1972.
29. Дьяконов В. П., Босый А. С., Кострюков А. С., Циганков В. А. Параметры и свойства специальных лавинных транзисторов//Известия вузов. Приборостроение, 1972, № 6.
30. Али-Заде Д. Г., Дьяконов В. П. Анализ N-образной вольт-амперной характеристики лавинного транзистора//Радиотехника, 1971, № 2.

31. Дьяконов В. П. Теория и расчет релаксационных генераторов на лавинных транзисторах. Известия вузов. Приборостроение, т. XIV, 1971, № 9, с. 8–13.
32. Дьяконов В. П. Формирование мощных наносекундных импульсов лавинными транзисторами с ограниченной областью объемного заряда. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1972, № 3.
33. Дьяконов В. П., Зиенко С. И. Физические основы работы лавинных транзисторов с ограниченной областью объемного заряда. Известия вузов — Приборостроение, т. XVII, 1974, № 6.
34. Дьяконов В. П. Предельные возможности лавинных транзисторов в импульсных цепях. Радиотехника, т. 31, № 7, 1976.
35. Дьяконов В. П. Коррекция формы импульсов в генераторах с разрядом накопительной линии через лавинный транзистор. Известия вузов СССР — Радиоэлектроника, т. XX, 1977, № 1.
36. Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Колебательные процессы при формировании мощных наносекундных импульсов лавинными транзисторами и их моделирование на ЭЦВМ. Известия вузов СССР — Радиоэлектроника, т. XXI, 1978, № 10.
37. Дьяконов В. П. Анализ переходных процессов емкостного релаксатора на лавинном транзисторе с учетом основных факторов его инерционности. Радиотехника и электроника, 1979, № 6.
38. Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Математическая модель биполярного транзистора для обычного и лавинного режимов работы. Радиотехника, т. 34, 1979, № 10.
39. Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Индуктивный релаксатор на лавинном транзисторе и его анализ на ЭВМ//Радиотехника, 1979, № 4.
40. Дьяконов В. П., Стерлягов А. А. Индуктивные релаксаторы на лавинных транзисторах//ПТЭ, 1973, № 2.
41. Дьяконов В. П. Генераторы с разрядной линией на лавинных транзисторах//ПТЭ, 1976, № 4.
42. Дьяконов В. П. Генераторы прямоугольных наносекундных импульсов на лавинных и мощных М. Д. П.—транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1980, № 4.
43. Дьяконов В. П. Генераторы наносекундных импульсов на лавинном и М. Д. П.—транзисторах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1981, № 1.
44. Дьяконов В. П. Импульсные схемы на интегральных лавинно-рекомбинационных диодах. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 1.
45. Дьяконов В. П. Лавинные полупроводниковые негатроны и их применение (Обзор). АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 3.

46. Дьяконов В. П. Генераторы мощных наносекундных импульсов для возбуждения полупроводниковых излучателей света // ПТЭ, 1976, № 5.
58. Дьяконов В. П. Формирователи наносекундных импульсов на лавинных и мощных сверхвысокочастотных транзисторах // ПТЭ, 1978, № 3.
59. Дьяконов В. П. Генераторы прямоугольных наносекундных импульсов на лавинных и мощных сверхвысокочастотных транзисторах // ПТЭ, 1978, № 3.
60. Дьяконов В. П. Генератор наносекундных импульсов на лавинных и мощных М.Д.П.-транзисторах // ПТЭ, 1980, № 4.
61. Дьяконов В. П. Генераторы наносекундных импульсов на лавинных и М.Д.П.-транзисторах // ПТЭ, 1981, № 1.
62. Смердов В. Ю., Адамов П. Г. Усилители и формирователи на мощных полевых GaAs-транзисторах с барьером Шоттки // ПТЭ, 1985, № 5.
63. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Смердов В. Ю. Формирователь мощных наносекундных импульсов // ПТЭ, 1985, № 5.
64. Дьяконов В. П., Адамов П. Г., Шляхтин А.Е. Импульсный усилитель на мощных полевых GaAs-транзисторах с субнаносекундным временем установления // ПТЭ, 1987, № 2.
65. Дьяконов В. П., Ваксенбург В. Я., Адамов П. Г. Генераторы субнаносекундных импульсов на арсенид-галлиевых полевых транзисторах // ПТЭ, 1987, № 5.
67. Дьяконов В. П., Адамов П. Г., Шляхтин А.Е. Импульсный усилитель на мощных полевых GaAs-транзисторах с субнаносекундным временем установления // ПТЭ, 1987, № 2.
68. Дьяконов В. П., Ваксенбург В. Я., Адамов П. Г. Генераторы субнаносекундных импульсов на арсенид-галлиевых полевых транзисторах // ПТЭ, 1987, № 5.
69. Дьяконов В. П., Адамов П. Г., Иванов А. И. Формирователь импульсов тока амплитудой 10 А с субнаносекундными фронтами // ПТЭ, 1988, № 6.
70. Могилин В.И., Смердов В. Ю. Генераторы субнаносекундных импульсов на мощных GaAs-полевых транзисторах // ПТЭ, 1989, № 5.
71. Дьяконов В. П. Однопереходные транзисторы и их аналоги. Теория и применение. — М.: СОЛОН-Пресс, 2008.
72. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение. Схемотехника, 2006, №7, с. 2–4, № 8, с. 2–5.
73. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. М.: СОЛОН-Пресс, 2008.
74. Дьяконов В. П. Широкодиапазонный автоколебательный мультивибратор на интегральных микросхемах транзисторно-транзисторной логики. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 2, с. 103–105.

75. Дьяконов В. П. Ждушие мультивибраторы на интегральных схемах. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3, с. 158–161.
76. Дьяконов В. П., Лыков А. Г. Высокостабильные мультивибраторы на интегральных микросхемах ТТЛ. АН СССР. Приборы и техника эксперимента, 1979, № 4, с. 141–143.
77. Королев М. В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 1980.
78. Fulkerson E. S., Norman D. C., Booth R. Driving Pockels Cells Using Avalanche Transistors Pulsers//IEEE International Pulse Power Conference. Baltimore, Maryland, 1997.
79. Щелев М. Я. Высокоскоростная электронно-оптическая техника за рубежом. В кн. "Физическая электроника". М.: Наука, 1976.
80. Дьяконов В. П., Грудень М. Н., Зиенко С. И., Смердов В. Ю. Импульсные источники питания полупроводниковых инжекционных лазеров // ПТЭ, 1986, № 5.
81. Грудень М. Н., Дьяконов В. П., Зиенко С. И., Смердов В. Ю. Импульсные источники питания мощных инжекционных лазеров.— М.: ЦНИИ "Электроника", 1984. (Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. Вып. 45).
82. Зиенко С. И., Пак Г. Т., Смердов В. Ю. Формирователь импульсов для питания полупроводниковых излучателей света // ПТЭ, 1984, № 2.
83. Дьяконов В. П., Смердов В. Ю. Импульсный источник электропитания полупроводниковых лазерных решеток на мощных ключевых МДП-транзисторах // ПТЭ, 1985, № 4.
84. PCO-7110 Pulsed Laser Diode Driver Module// The Pulse of Feature, Direct Energy Inc., 2000.
85. PCO-7810 Pulsed Laser Diode Driver Module// The Pulse of Feature, Direct Energy Inc., 2003.
86. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2002.
87. Рональд Дж. Точи, Нил С. Уидмер. Цифровые системы. Теория и практика. 8-е издание. Пер. с англ.- М.: Изд. дом "Вильямс", 2004.
88. Бернард Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ.- М.: Изд. дом "Вильямс", 2004.
89. Kirk C. T. A theory of transistor cut-off frequency (fT) fall-off of high current densities//IRE Trans, v. ED9, 1962.
90. Дьяконов В. П., Василькова Т. А. и Ермачковой Ю. А. Измерение импульсных параметров кремниевых транзисторов в лавинном режиме. Измерительная техника, 2007, № 7.

91. Дьяконов В. П. Функциональные генераторы. Схемотехника, 2006, № 9/10.
92. Афонский А.А., Харченко С. А. Генератор испытательных телевизионных сигналов АКТАКОМ АНР-3125. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 2.
93. Афонский А.А., Харченко С. А. Генератор испытательных телевизионных сигналов АКТАКОМ АНР-3126. Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 4.
94. Дьяконов В. П. Многофункциональные генераторы Tektronix AFG3000. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2006 (часть 1), №6 и 2007 (часть 2), №1.
95. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог 2007/2008. RONDE&RCHWARZ. — 2006. (www.rohde-rchwarz.com).
96. В. Дьяконов. Компьютеризованная лаборатория PC-LAB2000. М.: Ремонт и сервис, 2003, № 9.
97. В. Дьяконов, В. Смердов. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman. М.: Ремонт и сервис, 2004, № 2.
98. Дьяконов В. Виртуальные лаборатории. Обзор приставок и плат к персональному компьютеру. Ремонт и сервис, 2005, № 7, с. 48–53.
99. Дьяконов В. Новая виртуальная лаборатория PC-Lab 2000 v. 1.38 фирмы VELLEMAN INSTRUMENTS. Ремонт и сервис, 2006, № 3, с. 46–51.
100. Дьяконов В. П. Управление генераторами произвольных функций Tektronix AFG3000 с помощью программы ArbExpress. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 2.
101. Дьяконов В. П. Совместная работа генераторов произвольных функций Tektronix AFG3000 с осциллографами TDS1000B/2000B. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 3.
102. Дьяконов В. П. Современная лаборатория разработчика электронных схем. Схемотехника, 2007, № 7 и 2007, № 8.
103. Дьяконов В. П. Работа цифровых осциллографов TDS1000B/2000B с системой компьютерной математики MATLAB. Схемотехника, 2007, № 7 и 2007, № 8.
104. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж, 2001.
105. Дьяконов В. П. Энциклопедия Mathcad 2001i/11. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
106. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2002.
107. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.

108. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Изд-е 2-е переработанное и дополненное. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
109. Кудреватых Е. Ф. Основные принципы измерения характеристик электронных устройств. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2004, № 1, с. 32, 33.
110. Афонский А. А., Суханов Е. В. Измерения по заданной траектории в USB-лаборатории (измерительный комплекс АСК-4106). Контрольно-измерительные системы и приборы, 2004, № 2, с. 19–22.
111. Э. Ред. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Схемы, блоки, 50-омная схемотехника. Пер. с нем. — М.: Мир, 1990.
112. ZXYs of Signal Generators. Tektronix, 75W_16672_4.pdf.
113. Arbitrary Waveform Generators. AWG7000Series (AWG7102, AWG7101, AWG7052, AWG7052). Tektronix, 76W_19779.pdf.
114. Arbitrary Waveform Generators. AWG5000Series (AWG5014, AWG5012, AWG5001, AWG5002). Tektronix, 76W_20381.pdf.
115. Characterization of IQ Modulators Counts On Flexible Signal Generator Simuls. Application Note. Tektronix, 75W_20744_0.pdf.
116. Arbitrary/Function Generators provide versatile stimulus in RF Applications. Tektronix, 75W_21197_0.pdf.
117. Direct Synthesis Comes to the Art of Serial Measurements. Tektronix, 76W_19777.pdf.
118. Ultra Wide Bandwidth Technology and Test Software. Tektronix, 76W_20475_0.pdf.
119. Джонатан Мис (Tektronix, Inc.). Измерение параметров сверхширокополосных сигналов: проблемы и решения. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 3.
120. Кристоф Раушер. Основы спектрального анализа. М.: Rohde&Schwarz, Горячая линия — Телепорт. — 2006.
121. Юрген Остермайер (R&S). Прецизионные сигналы для тестирования аэронавигационных приемников. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 4.
122. Эндрю Уилсон (Agilent Technologies). Большой шаг в измерении джиттера. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2006, № 5.
123. Анализатор сигналов FSUP компании ROLHDE&SCHWARZ. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2006, № 6, декабрь.
124. Тревор Смит (Tektronix, Inc.). Технология цифровой обработки сигналов упрощает проведение анализа высокоскоростной последовательной передачи данных. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 5.
125. Дьяконов В. П. Ноутбуки. Изучаем, работаем, развлекаемся. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.

126. <http://www.eliks.ru>. Интернет-сайт компании "Эликс".
127. <http://www.mprofit.ru/catalog203.htm>. Интернет-сайт организации НПЦ Макс-Профит.
128. <http://www.platan.ru>. Интернет-сайт фирмы Платан, каталог электронных компонентов и техническая документация.
129. <http://www.prist.ru>. Интернет-сайт фирмы Прист, каталог электронных компонентов и техническая документация.
130. <http://www.alphalas.com>. Интернет-сайт фирмы ALPHALAS.
131. <http://www.ioffe.ru/Optothyristor/rus/lab/products.html>. Страница интернет-сайта физико-технологического института Иоффе.
132. Герман Шрайбер. 400 новых радиоэлектронных схем. М.: ДМК Пресс. — 2006.
133. Вавилов А. А., Солодовников А. И., Шнайдер В. В. Низкочастотные измерительные генераторы. Энергоатомиздат, 1985.

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «АЛЪЯНС-КНИГА» наложенным платежом, выслать открытку или письмо по почтовому адресу: **123242, Москва, а/я 20** или по электронному адресу: **orders@alians-kniga.ru**.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя. Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в Internet-магазине: **www.alians-kniga.ru**.

Оптовые закупки: тел. **(495) 258-91-94, 258-91-95**; электронный адрес **books@alians-kniga.ru**.

Дьяконов Владимир Павлович

ГЕНЕРАЦИЯ И ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dm@dmk-press.ru

Литературный редактор *Галушкина А. В.*

Компьютерная верстка *Титовой Л. А.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 24.10.2008. Формат 70×100^{1/16}.

Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 36. Тираж 1000 экз.

Издательство ДМК Пресс

Web-сайт издательства: www.dmk-press.ru

Internet-магазин: www.alians-kniga.ru