

# Содержание

## ▼ Глава 6

Аппаратура анализа спектра, сигналов и цепей.....	12
6.1. Принципы построения анализаторов спектра .....	12
6.1.1. Спектральное представление сигналов и процессов .....	12
6.1.2. Принципы построения гетеродинных анализаторов спектра .....	15
6.1.3. Основные типы детекторов в анализаторах спектра .....	18
6.1.4. Шум анализаторов спектра .....	20
6.1.5. Основные установки в анализаторах спектра .....	22
6.1.6. Гетеродинный анализатор спектра АКС-1100/1101 .....	24
6.1.7. Функциональная схема современного цифрового анализатора спектра .....	27
6.1.8. Векторные цифровые анализаторы спектра .....	28
6.2. Серийные цифровые анализаторы спектра .....	29
6.2.1. Отечественные цифровые анализаторы спектра .....	29
6.2.2. Анализаторы спектра зарубежных фирм.....	34
6.3. Анализаторы спектра реального времени .....	46
6.3.1. Назначение анализаторов спектра реального времени .....	46
6.3.2. Функциональная схема и работа анализатора спектра реального времени .....	47
6.3.3. Цифровое преобразование сигналов в анализаторах спектра реального времени .....	51
6.3.4. Синхронизация анализаторов спектра реального времени .....	53
6.3.5. Основные способы представления результатов анализа .....	56
6.3.6. Серийные цифровые анализаторы спектра реального времени .....	61
6.3.7. Примеры работы с анализатором Tektronix RSA 6114A .....	68
6.4. Анализаторы сигналов и источников сигналов.....	78
6.4.1. Методы измерения фазового шума .....	78
6.4.2. Системы параметров для радиочастотных цепей .....	79
6.4.3. Измерительный приемник фирмы R&S FMSR .....	81
6.4.4. Анализатор источников сигналов фирмы R&S FSUP .....	82

6.4.5. Радиочастотные векторные анализаторы сигналов Keithley 2810/2820 .....	83
6.4.6. Многопортовые векторные анализаторы цепей .....	85
6.5. Анализ телекоммуникационных сигналов .....	88
6.5.1. Требования к анализаторам телекоммуникационных сигналов.....	88
6.5.2. Анализаторы телекоммуникационных сигналов корпорации Tektronix .....	89
6.5.3. Анализаторы последовательностей реального времени SDA 18000/10000/9000 фирмы LeCroy .....	91
6.6. Осциллографы специального назначения .....	95
6.6.1. Обзор осциллографов корпорации Yokozawa .....	95
6.6.2. Осциллографы серии DL 9000 .....	97
6.6.3. Осциллографы DLW/DL 6000 и DL 1720E и DL 1740E.....	99
6.6.4. Осциллографы DL 1620/1640.....	100
6.6.5. Осциллографы-регистраторы класса DL 750 Scope Corder .....	100
6.6.6. Осциллограф-регистратор DL 850.....	103
6.6.7. Осциллограф-регистратор SL 1400.....	105
6.6.8. Осциллограф-регистратор SL 1000 .....	106
6.6.9. Осциллографы европейских фирм .....	107
6.7. Анализаторы спектра с трекинг-генератором.....	118
6.7.1. Что такое трекинг-генератор?.....	118
6.7.2. Включение трекинг-генератора, его калибровка и проведение измерений.....	122
6.7.3. Применение трекинг-генератора совместно с осциллографом.....	126
6.7.4. Измерение параметров коаксиальных компонентов и аттенюаторов .....	128
6.7.5. Тестирование активного осциллографического пробника .....	128
6.7.6. Снятие АЧХ полосового фильтра на резонансных контурах.....	131
6.7.7. Исследование кварцевых резонаторов различного типа .....	132
6.7.8. Ограничения при работе с трекинг-генератором.....	139

## ▼ Глава 7

Компьютеризированные лаборатории и их программное обеспечение.....	140
7.1. Стыковка цифровых измерительных приборов с компьютером .....	140
7.1.1. Основные типы внешних устройств для анализаторов.....	140
7.1.2. Порты для подключения измерительных приборов к компьютеру.....	141
7.2. Программное обеспечение измерительных приборов и систем.....	143
7.2.1. Основные виды программного обеспечения измерительных приборов и систем .....	143
7.2.2. Замена фирменного программного обеспечения.....	145
7.3. Подключение к компьютеру цифровых осциллографов.....	146

---

7.3.1. Подключение к компьютеру осциллографов.....	146
7.3.2. Общие возможности программы Open Choice Desktop.....	148
7.3.3. Выбор инструмента.....	149
7.3.4. Передача осциллограмм в память компьютера и в буфер.....	149
7.3.5. Считывание данных и установок осциллографа.....	150
7.3.6. Работа с установками Preferences.....	154
7.4. Программа NI SignalExpress Tektronix Edition.....	158
7.4.1. Назначение программы NI SignalExpress Tektronix Edition.....	158
7.4.2. Запуск программы NI SignalExpress Tektronix Edition.....	158
7.4.3. Основное окно программы NI SignalExpress Tektronix Edition.....	160
7.4.4. Работа с инструментами программы NI SignalExpress Tektronix Edition.....	160
7.5. Работа с программой ArbExpress.....	162
7.5.1. Назначение программы ArbExpress.....	162
7.5.2. Установка и запуск программы ArbExpress.....	163
7.5.3. Задание сигналов стандартных форм.....	164
7.5.4. Контроль и управление файлами.....	167
7.5.5. Задание сигналов, заданных математическими функциями.....	168
7.5.6. Примеры программирования сложных сигналов.....	170
7.5.7. Задание сигналов заданной графической формы.....	173
7.5.8. Задание сигналов по их реальным осциллограммам.....	175
7.6. Работа измерительных приборов с системой MATLAB.....	180
7.6.1. Назначение матричной системы MATLAB.....	180
7.6.2. Подготовка к стыковке осциллографов с системой MATLAB.....	181
7.6.3. MATLAB-программы для работы с цифровыми осциллографами.....	183
7.6.4. Спектральный анализ осциллограмм в MATLAB.....	188
7.6.5. Построение спектрограмм осциллограмм в MATLAB.....	192
7.7. Управление генераторами произвольных сигналов от системы MATLAB.....	195
7.7.1. От множества генераторов к одному генератору произвольных сигналов.....	195
7.7.2. Системы компьютерной математики для работы с генераторами произвольных сигналов.....	196
7.7.3. Управление генераторами серии AFG3000 от матричной системы MATLAB.....	196
7.7.4. Применение системы MATLAB при совместной работе генератора и цифрового осциллографа.....	200
7.8. Программа R&S FreRes для снятия и измерения частотных характеристик.....	203
7.8.1. Назначение программы FreRes фирмы R&S.....	203
7.8.2. Окно и основное меню программы FreRes.....	204
7.8.3. Windows-меню программы FreRes.....	205
7.8.4. Выбор типа устройств.....	205
7.8.5. Выбор параметров свипирования.....	206

7.9. Цифровые измерительные приборы как системы компьютерной математики .....	207
7.9.1. Интеграция цифровых измерительных приборов .....	207
7.9.2. Многодоменный цифровой осциллограф и анализатор спектра радиочастот MDO4000 корпорации Tektronix .....	209
7.9.3. MDO4000 в роли цифрового осциллографа .....	215
7.9.4. MDO4000 в роли анализатора спектра .....	216
7.9.5. Различные типы окон .....	223
7.9.6. Возможность построения спектрограмм .....	226
7.9.7. Просмотр спектра каналов в многоканальных системах .....	227
7.9.8. Применение шумоподавления .....	228
7.10. Вейвлеты в осциллографии .....	229
7.10.1. Вейвлет анализ сложного сигнала .....	229
7.10.2. Средства GUI для работы с вейвлетами .....	232
7.10.3. Вейвлет-очистка сигнала от шума и компрессия сигнала .....	233
7.10.4. Очистка сигналов с помощью пакетных вейвлетов .....	236
7.10.5. Скейлингграммы в новых версиях Wavelet Toolbox .....	237

## ▼ Глава 8

Компоненты высокоскоростных устройств и систем и их тестирование .....	240
8.1. Параметры пассивных компонентов .....	240
8.1.1. Идеальные и реальные резисторы .....	240
8.1.2. Идеальная и реальная индуктивности .....	241
8.1.3. Идеальный и реальный конденсаторы (емкости) .....	242
8.2. Измерение параметров реактивных компонентов .....	244
8.2.1. Иммитанс, адмитанс и импеданс цепей .....	244
8.2.2. Общий обзор цифровых измерителей иммитанса и импеданса .....	245
8.2.3. Цифровой измеритель иммитанса E7-20 .....	246
8.2.4. Малогабаритный измеритель иммитанса E7-25 .....	252
8.2.5. Работа с измерителем иммитанса E7-20 .....	253
8.2.6. Широкодиапазонный RLC-измеритель AM-3001 .....	255
8.2.7. Лабораторные LCR-измерители компании Good Will .....	256
8.2.8. Лабораторные LCR-измерители АК ИП серии 61** .....	258
8.2.9. Высокочастотные LCR-измерители фирмы WK .....	260
8.3. Современные СВЧ-компоненты .....	264
8.3.1. Широкополосные аттенюаторы, переходники и тройники .....	264
8.3.2. Переходники – блокираторы постоянной составляющей сигнала .....	267
8.3.3. Ограничители СВЧ-мощности .....	267
8.3.4. СВЧ-детекторы .....	268
8.3.5. Источники шума серий 346 и N4001 .....	271
8.3.6. Сенсоры мощности с USB-интерфейсом .....	272

8.4. Монолитные микросхемы СВЧ-аттенюаторов фирмы Hittite Microwave .....	275
8.4.1. СВЧ-микросхемы аттенюаторов с фиксированным ослаблением.....	275
8.4.2. Микросхемы аттенюаторов с аналоговым управлением .....	277
8.4.3. Микросхемы аттенюаторов с цифровым управлением .....	278
8.5. Высокоскоростные коммутаторы и обострители .....	280
8.5.1. Электромеханические коммутаторы СВЧ-сигналов фирмы Agilent .....	280
8.5.2. Высокоскоростные коммутаторы на р-і-п-диодах .....	280
8.5.3. Высокоскоростные коммутаторы на GaAs полевых транзисторах .....	283
8.5.4. Конверторы времени нарастания и спада импульсов.....	285
8.5.5. Монолитные микросхемы коммутаторов СВЧ-сигналов .....	286
8.5.6. Коммутационные процессы и их тестирование .....	288
8.6. Тестирование СВЧ-фильтров анализатором спектра с трекинг-генератором.....	292
8.6.1. Тестирование СВЧ-полосового фильтра на объемных резонаторах .....	292
8.6.2. Тестирование СВЧ-полосовых микрополосковых фильтров.....	294
8.7. Контроль линий передачи .....	297
8.7.1. Импульсная рефлектометрия.....	297
8.7.2. Цифровой осциллограф в роли рефлектометра .....	298
8.7.3. Расшифровка рефлектограмм .....	300
8.7.4. Портативные цифровые рефлектометры РЕЙС-105 .....	301
8.7.5. Портативные цифровые рефлектометры РЕЙС-205 .....	303
8.7.6. Портативные цифровые рефлектометры РЕЙС-305 .....	309
8.8. Испытание световолоконных кабелей и линий передачи.....	317
8.8.1. Конструкция и параметры световодов.....	317
8.8.2. Оптическая рефлектометрия.....	321
8.8.3. Стационарные оптические рефлектометры.....	323
8.8.4. Оптические мини-рефлектометры.....	328
8.8.5. Оптические мини-рефлектометры фирмы EXFO .....	334
8.8.6. Карманный оптический рефлектометр FOD-7202 .....	337
8.8.7. Оптический мини-рефлектометр FOD-7005.....	340
8.8.8. Мини-рефлектометр ТОПА3-9000 .....	341
8.8.9. Оптический рефлектометр МТР 9000А .....	342
8.8.10. Оптический рефлектометр E6000С фирмы Agilent.....	343
8.9. Анализ спектра оптического излучения .....	344
8.9.1. Анализаторы спектра оптического излучения.....	344
8.9.2. Оптические фильтры анализаторов оптического спектра .....	346
8.9.3. Светосильный спектрометр SPT-DDHR-04 .....	348
8.9.4. Анализаторы оптического спектра фирмы EXPO .....	350
8.9.5. Примеры применения анализатора спектра оптического диапазона.....	354
8.9.6. Анализаторы оптического спектра Anritsu MS9710B/C.....	356
8.9.7. Анализаторы оптического спектра Yokozawa AQ6319/6370 .....	357
8.9.8. Портативные анализаторы спектра оптического диапазона .....	360
8.9.9. Сверхминиатюрные анализаторы оптического спектра.....	365

## ▼ Глава 9

### Исследование быстропротекающих процессов

в микроэлектронных устройствах .....	367
9.1. Исследование полупроводниковых диодов.....	367
9.1.1. Общие вопросы измерения параметров диодов.....	367
9.1.2. Источники/измерители фирмы Keithley серии 2400/2600.....	368
9.1.3. Определение и измерение дифференциальных параметров .....	372
9.1.4. Измерения динамических параметров высокоскоростных диодов .....	375
9.1.5. Измерение времени переключения туннельных диодов .....	377
9.2. Исследование биполярных и полевых транзисторов.....	379
9.2.1. Методы снятия ВАХ транзисторов .....	379
9.2.2. Характериографы для снятия ВАХ транзисторов .....	381
9.2.3. Исследование полевых транзисторов .....	385
9.3. Исследование переходных процессов переключения транзисторов.....	386
9.3.1. Выбор генераторов переключающих импульсов.....	386
9.3.2. Исследование переходных процессов при переключении биполярных транзисторов .....	389
9.3.3. Измерение параметров МДП-транзисторов во временной области...393	
9.3.4. Измерение времени переключения арсенид-галлиевых транзисторов .....	397
9.3.5. Измерение времени переключения лавинных транзисторов.....	399
9.3.6. Оценка времени переключения сверхскоростных микротранзисторов .....	405
9.4. Измерение радиочастотных параметров полупроводниковых приборов и микросхем.....	407
9.4.1. Измерение радиочастотных параметров цифровыми осциллографами .....	407
9.4.2. Измерение радиочастотных параметров с помощью генераторов и анализаторов спектров, сигналов и цепей.....	408
9.4.3. Комплекс измерения радиочастотных параметров фирмы Keithley.....	409
9.4.4. Система параметрического контроля радиочастотных параметров микросхем S600 .....	410
9.5. Тестирование скоростных интегральных микросхем.....	411
9.5.1. Тестирование интегральных усилителей .....	411
9.5.2. Тестирование интегральных компараторов.....	413
9.5.3. Тестирование сверхскоростных интегральных схем .....	415
9.6. Контроль цифровых и логических микросхем .....	421
9.6.1. Назначение логических анализаторов .....	421
9.6.2. Функциональная схема логического анализатора.....	424
9.6.3. Этапы работы с логическим анализатором.....	425
9.6.4. Запуск логического анализатора и синхронизация .....	426
9.6.5. Синхронный и асинхронный режимы сбора данных.....	427

9.6.6. Глитчи в цифровой аппаратуре и проблема их обнаружения .....	428
9.7. Современные логические анализаторы .....	428
9.7.1. Логические анализаторы фирмы Agilent Technologies .....	428
9.7.2. Логические анализаторы фирмы Tektronix .....	430
9.7.3. Логические анализаторы фирмы Leaptronix .....	435
9.7.4. Логические анализаторы фирмы Hewlett Packard .....	436
9.7.5. Осциллографы смешанных сигналов как логические анализаторы .....	437
9.7.6. Осциллографы смешанных сигналов DL 9000 .....	440
9.7.7. Осциллографы смешанных сигналов DL 7000 .....	442
9.7.8. Осциллографы DLM 2000 .....	442
9.7.9. Пробники для логических анализаторов .....	444

## ▼ Глава 10

### Исследование быстропротекающих процессов

в оптических и радиофизических системах и устройствах .....	449
10.1. Светодиоды, лазерные диоды и фотоприемники .....	449
10.1.1. Типы полупроводниковых оптико-электронных приборов .....	449
10.1.2. Конструкция и характеристики обычных светодиодов .....	450
10.1.3. Конструкция и характеристики лазерных светодиодов .....	453
10.1.4. Конструкция и характеристики фотоприемников .....	456
10.2. Методы и приборы для исследования излучателей светового излучения .....	459
10.2.1. Интегрирующая сфера 2500INT фирмы Keithley .....	459
10.2.2. Построение системы для исследования излучателей света .....	461
10.2.3. Источники/измерители серии 2400 для IV тестирования оптоэлектронных приборов .....	464
10.3. Исследование импульсных лазерных излучателей .....	465
10.3.1. Интегрирующая сфера для импульсных лазерных излучателей 2520INT .....	465
10.3.2. Система тестирования импульсных лазерных излучателей 2520 .....	467
10.4. Исследование фотодиодов и фототранзисторов .....	468
10.4.1. Снятие статических характеристик фотодиодов и фототранзисторов .....	468
10.4.2. Многоканальная I-V система тестирования 4500-MTS .....	469
10.4.3. Двухканальный пикоамперметр серии 2502 для фотодиодных измерений .....	470
10.4.4. Системные источники/измерители 2602/2612 для LIV-тестирования .....	471
10.5. Исследование высокоскоростных излучателей и приемников света .....	472
10.5.1. Особенности динамики излучения высокоскоростных лазерных диодов .....	472
10.5.2. Установка для исследования динамики излучения высокоскоростных лазерных диодов .....	473

10.5.3. Наблюдение эффекта обострения фронта импульса лазерного излучения.....	475
10.5.4. Запуск мощных лазерных диодов и лазерных решеток.....	477
10.5.5. Импульсные генераторы и оптические модули фирмы DEI.....	481
10.5.6. Исследование сверхскоростных светодиодов и фотоприемников ...	484
10.6. Методы формирования высоковольтных и сильноточных импульсов на лавинных транзисторах .....	486
10.6.1. Простейшие генераторы мощных импульсов для запуска лазерных светодиодов .....	486
10.6.2. Генераторы с последовательным включением лавинных транзисторов .....	487
10.6.3. Генераторы на лавинных транзисторах, построенные по схеме Аркадьева-Маркса.....	490
10.6.4. Генераторы с параллельным включением лавинных транзисторов.....	492
10.6.5. Генераторы и модули с комбинированным включением лавинных транзисторов .....	493
10.6.6. Конструктивное выполнение генераторов коротких импульсов .....	496
10.7. Генераторы мощных наносекундных импульсов на лавинных тиристорах.....	498
10.7.1. Генератор с емкостным накопителем .....	498
10.7.2. Генератор прямоугольных импульсов с накопительной кабельной линией.....	499
10.7.3. Генератор прямоугольных импульсов с формирующим двухполюсником .....	501
10.8. Высокоскоростное управление электронными приборами .....	503
10.8.1. О применении лавинных транзисторов для управления электронными приборами.....	503
10.8.2. Запуск электронных и электронно-полупроводниковых ламп .....	504
10.8.3. Схема быстрого стробирования фотоэлектронного умножителя.....	505
10.8.4. Генератор кодовых последовательностей с частотой заполнения 0,75 ГГц .....	506
10.8.5. Управление 0,25 ГГц импульсным лазерным излучением .....	508
10.8.6. Лавинные транзисторы в схемах управления ячейками Поккельса.....	512
10.8.7. Схемы управления ячейками Поккельса на лавинных транзисторах в комбинации с другими приборами .....	515
10.8.8. О других средствах формирования высоковольтных импульсов с субнаносекундными фронтами .....	517
10.8.9. Сверхскоростная развертка на лавинных транзисторах.....	518
10.8.10. Лавинные транзисторы в ультразвуковых эхо-импульсных толщиномерах .....	519
10.9. Исследование антенн импульсными сигналами и сверхширокополосная связь.....	522
10.9.1. Техника измерения параметров антенн.....	522
10.9.2. Типичная установка для измерения параметров антенн.....	522



---

10.9.3. Технические характеристики установки для измерения параметров антенн .....	524
10.9.4. О выборе формы импульсов для испытания антенн .....	526
10.9.5. Типичная функциональная схема сверхширокополосной системы связи.....	527
10.10. Исследование видео- и подповерхностных радаров.....	529
10.10.1. Возбуждение антенн для видеолокаторов и георадаров .....	529
10.10.2. Георадары серии «Вий» (VIY).....	532
10.11. Генераторы сверхмощных наносекундных импульсов на SOS-диодах ...	535
10.11.1. Высоковольтные модули на SOS-диодах .....	535
10.11.2. Генераторы коротких импульсов на высоковольтных модулях с SOS-диодами.....	536
10.11.3. Частотные генераторы мощных коротких импульсов на SOS-диодах.....	538
10.12. Генераторы сверхмощных электромагнитных и оптических импульсов.....	544
10.12.1. Возможности генераторов сверхмощных импульсов в военной сфере.....	544
10.12.2. Растяжение, сжатие и усиление импульсов лазерного излучения пико- и фемтосекундного диапазонов.....	548
10.12.3. Методы исследования импульсов лазерного излучения пико- и фемтосекундного диапазона .....	550
10.12.4. Оптоэлектронный стробоскопический осциллограф.....	552
10.12.5. Мощные лазеры, генерирующие импульсы пико- и фемтосекундного диапазонов .....	555
Литература .....	557

# Аппаратура анализа спектра, сигналов и цепей



Осциллографические методы исследования быстропротекающих процессов далеко не исчерпываются применением аналоговых и цифровых осциллографов. Создан ряд осциллографических приборов для специализированного анализа таких процессов – *анализаторов*. В этой главе описаны основные типы анализаторов спектра, логических устройств, сигналов и цепей. Их применение значительно расширяет возможности методов осциллографического исследования быстропротекающих процессов и устройств, основанных на их применении.

## 6.1. Принципы построения анализаторов спектра

### 6.1.1. Спектральное представление сигналов и процессов

Как известно, есть две основные формы представления сигналов и процессов – во временной области и в частотной области. Их взаимосвязь определяется преобразованиями Фурье, имеющими фундаментальное значение [18]. Нередко представление сигналов и процессов более целесообразно в той или иной области. Например, осциллография сигналов и процессов основана на представлении их во временной области. Оно кажется наиболее естественным. Но только кажется!

Если мы подадим на вход достаточно широкополосного осциллографа сигнал от антенны, то маловероятно, что из этого сигнала можно будет выудить какую-то информацию. Разве что убедиться в большой мощности местной радиостанции, забивающей все прочие сигналы. Но, скорее всего, такой сигнал будет выглядеть как хаоти-

ческий, поскольку создается массой излучающих электромагнитные колебания устройств – радиостанций, атмосферных помех, промышленных и медицинских ВЧ-установок и т. д. и т. п.

Однако если рассматривать спектр такого сигнала (например, на анализаторе спектра), то перед нами предстанет удивительная картина живого эфира – будет видна работа каждой радиостанции и каждого источника излучения. Можно сразу оценить частоту каждого сигнала на частотной шкале анализатора спектра, его уровень, вид модуляции и активность в данный момент.

Еще важнее переход к анализу представлений сигналов в частотной области в новейших видах широкополосной связи и локации. Многие такие системы используют шумоподобные сигналы, уровень которых намного ниже уровня шумов эфира. Разглядеть их на экране осциллографа уже по этой причине невозможно. В то же время спектр сигналов способен выявить многие такие сигналы и их особенности. В частности, это обусловлено тем, что при просмотре спектра нередко используется накопление когерентных сигналов.

Можно привести и еще более простые и наглядные примеры. Например, на цифровых осциллографах просмотр амплитудно-модулированных сигналов в реальных диапазонах частот (когда частота несущей намного выше частоты модуляции) не позволят наблюдать несущую частоту и корректно измерить ее частоту, уровень и фазу. Практически бесполезно наблюдение во временной области сигналов с частотной, фазовой и тем более кодоимпульсной модуляцией, хотя именно эти виды модуляции широко используются в современных высокоскоростных линиях передачи информации и в системах связи.

Даже наблюдение искаженных, почти синусоидальных сигналов не позволяет оценить количественно степень их искажений (например, измерить коэффициент нелинейных искажений). Для этого требуется перейти к спектральным методам представления и анализа таких сигналов.

Как было показано в разделе 2.3, периодические сигналы могут быть представлены совокупностью синусоидальных составляющих с частотой, кратной частоте повторения сигнала, – частотой первой гармоники  $f_1$ . При этом амплитудный спектр сигналов является линейчатым и имеет вид отрезков прямых с высотой, равной амплитуде соответствующей гармоники, и частотой  $kf_1$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Понятие спектра периодического сигнала можно распространить на непериодический сигнал, расположенный на конечном отрезке времени. При этом спектр будет сплошным и характеризовать спек-

тральную плотность сигнала – рис. 6.1. Если периодический сигнал получается повторением отрезка произвольного сигнала, то называется квазипериодическим. Спектр такого сигнала показан на рис. 6.1б и 6.1в. Линии спектра (в виде отрезков прямых) расположены с интервалом частот  $df = 1/T$ , где  $T$  – отрезок времени, на котором задан сигнал.

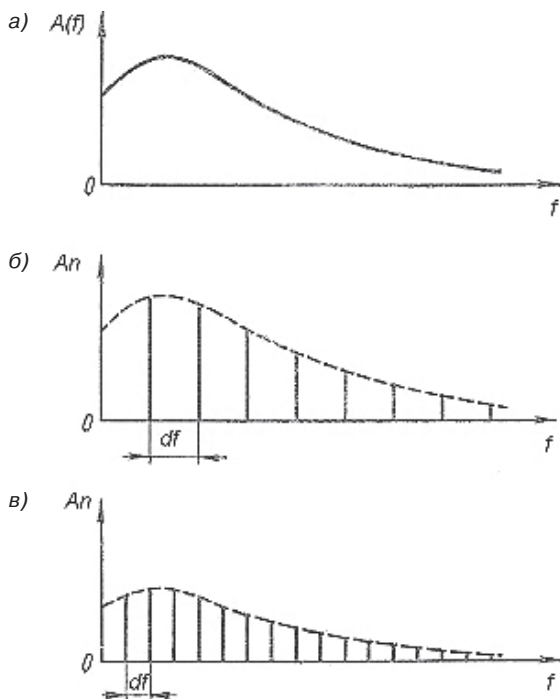


Рис. 6.1. Спектр непериодического (а) и квазипериодического (б и в) сигналов

Многие современные цифровые осциллографы имеют ограниченные средства проведения спектрального анализа наблюдаемых сигналов. Однако разрешение по частоте при этом невелико, спектр сигналов явно отличается от теоретического (вида рис. 6.1), диапазон частот недостаточно широк и т. д. Приборы, специально предназначенные для проведения спектрального анализа сигналов, получили название анализаторов спектра. Они и описаны в данной главе.

## 6.1.2. Принципы построения гетеродинных анализаторов спектра

Многие годы разложение реальных сигналов в ряд Фурье казалось теоретической абстракцией. Но появление резонансных умножителей частоты, узкополосных супергетеродинных радиоприемников, а позже и анализаторов спектра на их основе показало, что гармоники у периодических сигналов существуют объективно как физическое свойство сигналов. Сигналы можно разложить на гармоники (*спектральный анализ*), а можно с заданной точностью синтезировать путем сложения гармоник (*спектральный синтез*).

Первые *гетеродинные анализаторы спектра* строили спектр скалярных амплитуд или мощностей гармоник в функции от частоты [189–206]. Упрощенная блок-схема гетеродинного анализатора спектра с одним преобразованием представлена на рис. 6.2.

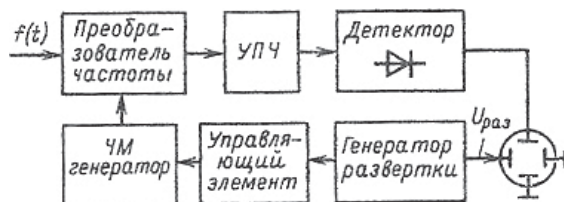


Рис. 6.2. Функциональная схема гетеродинного анализатора спектра с одним преобразованием

Генератор развертки обеспечивает перемещение луча электронно-лучевой трубки по горизонтали и одновременно изменение частоты гетеродина по линейному, а много реже и по логарифмическому, закону. Средняя частота отображаемого спектра (CF – Central Frequency) задается средней частотой гетеродина, которая может перестраиваться. Для этого используется регулирующий элемент – чаще всего варикап (диод, емкость которого зависит от напряжения). Он же используется для качания частоты вокруг ее среднего значения. Участок исследуемого спектра преобразуется в область с центральной частотой, равной промежуточной частоте. Усилитель промежуточной частоты УПЧ не только усиливает преобразованный сигнал, но и формирует полосу частот частотного разрешения. Максимальное изменение частоты гетеродина формирует область частот спектра (обычно ее обозначают Scan).

Хорошо известно, что частота сигнала в супергетеродинном приемнике равна:

$$f_c = f_r \pm f_n, \quad (6.1)$$

где  $f_r$  – частота гетеродина и  $f_n$  – промежуточная частота. Если принять, что  $f_c = f_r - f_n$  – частота основного канала, то  $f_c = f_r + f_n$  будет частотой зеркального канала. Прием зеркального канала нежелателен и обычно устраняется частотной фильтрацией входного сигнала. В общем случае частоты сигнала и гетеродина надо умножить на целые числа – номера используемых гармоник, связанных с нелинейностью входного тракта и гетеродина. В результате могут появиться дополнительные частоты сигнала, что является следствием *интермодуляционных искажений*.

Для управления частотой гетеродина в первых анализаторах спектра использовались гетеродины с электронной перестройкой с помощью варикапов (диодов, емкость которых зависит от напряжения). Для перестройки частоты в широких пределах в гетеродинах используются резонаторы на железиттриевом гранате (ЖИГ), которые перестраиваются магнитным полем.

Сразу становится очевидным то, что спектральная линия в таком анализаторе не может быть вертикальным отрезком прямой. Она будет иметь вид линии, представляющей графически АЧХ УПЧ, и напоминать при медленном качании частоты резонансную кривую колебательного контура (или системы контуров, входящих в УПЧ). Естественно, что в УПЧ анализаторов спектра стараются сделать АЧХ одnogорбой и довольно узкой. Последнее обеспечивает достаточное разрешение по частоте.

Во избежание динамических искажений АЧХ анализатора спектра перестройка частоты должна быть достаточно медленной. Если это не так, то возникают динамические искажения АЧХ, показанные на рис. 6.3 [2]. Искажения АЧХ и снижение точности измерения частоты по пику резонансной кривой АЧХ являются очевидными недостатками гетеродинных анализаторов спектра.

Для обеспечения стабильности спектров частота гетеродина должна быть высокостабильной. Практически в современных анализаторах спектра это реализуется с помощью цифрового синтезатора частоты гетеродина. При этом типовая нестабильность частоты гетеродина составляет  $10^{-6}$ – $10^{-5}$ . В некоторых анализаторах спектра, предназначенных для высокочастотных сигналов, иногда используются гармоники гетеродина. Но их выделение и очистка от субгар-

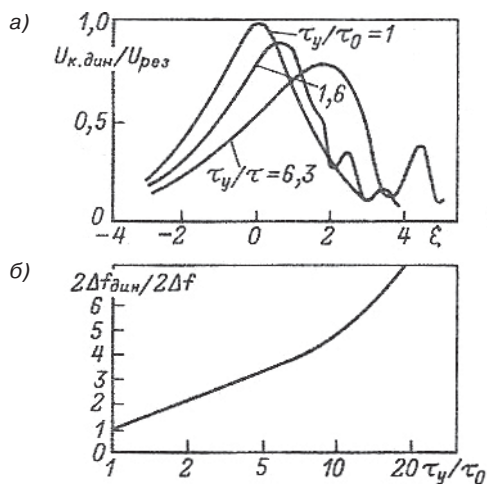


Рис. 6.3. АЧХ УПЧ при различной скорости качания частоты (а) и динамическая погрешность определения частоты по пику резонансной кривой (б)

моник довольно сложны. Компромиссом является использование второй гармоники частоты гетеродина.

Выбор промежуточной частоты гетеродинных анализаторов спектра противоречив. Так, для устранения зеркального канала ее приходится выбирать большей – выше максимальной частоты анализируемого сигнала. Но это ведет к широкой АЧХ усилителя промежуточной частоты и значительному ухудшению разрешающей способности анализаторов спектра. Поэтому анализаторы спектра строят на основе супергетеродинных радиоприемников с двойным и даже тройным преобразованием частоты, что снимает противоречия между степенью подавления зеркального канала и разрешением по частоте тракта промежуточной частоты. К сожалению, при этом растет число побочных каналов приема и появляются паразитные спектральные составляющие, устранение которых возможно, но достаточно сложно.

Для повышения избирательности последнего тракта ПЧ средняя частота  $f_n$  должна быть достаточно низкой. Повышение избирательности достигается применением многоконтурных фильтров на колебательных контурах или электромеханических фильтров (ЭМФ). Часто последние применяются в виде опций и позволяют довести полосу частот УПЧ до десятков герц. В современных анализаторах

спектра широко применяются и цифровые фильтры, позволяющие легко довести частотное разрешение спектров до 1 Гц и получить требуемую форму АЧХ без заметного усложнения УПЧ.

Спектр в гетеродинном анализаторе представлен огибающей сигнала на выходе УПЧ. Для ее выделения служит *детектор*. После него сигнал становится видеосигналом. Могут использоваться детекторы различного типа, например минимального, максимального или среднеквадратического значения. Для расширения динамического диапазона анализатора спектра используется логарифмический УПЧ или УПЧ с логарифмическим преобразователем.

Многие анализаторы спектра этого класса имеют следящий генератор (или свип-генератор), вырабатывающий синусоидальный сигнал с частотой, равной перестраиваемой частоте исследуемого сигнала. Обычно он именуется *трекинг-генератором* и поставляется в виде опции. Наличие генератора превращает анализатор спектра в полноценный измеритель АЧХ четырехполюсников, работающий в том же диапазоне частот, что и анализатор спектра. Стоит, однако, отметить, что дополнение анализатора спектра следящим генератором заметно его удорожает.

### **6.1.3. Основные типы детекторов в анализаторах спектра**

В первых анализаторах спектра супергетеродинного типа использовались обычные диодные детекторы, которые широко применялись в радиоприемниках амплитудно-модулированных сигналов. Схемотехника их хорошо известна и применительно к анализаторам спектра довольно детально описана в [190]. В современных анализаторах спектра используются детекторы, основанные на применении дискретных отсчетов (выборки) сигнала с выхода УПЧ.

Различные типы детекторов по-разному обрабатывают сигналы с выхода УПЧ. Рассмотрим функциональное назначение и особенности различных типов детекторов.

#### *Детектор максимального пикового значения*

Обычный пиковый детектор является детектором максимального значения сигнала. Он широко применяется для фиксации пиков спектра. Если детектирование цифровое, то детектор максимального значения просто отбирает выборки с максимальной амплитудой. Его сигнал обычно представляется маркером, который установлен в заданное место экрана.



**Детектор минимального пикового значения**

Детектор минимального значения служит для определения минимального значения сигнала. Если используется цифровое детектирование, то это означает выделение выборки с минимальной амплитудой.

**Автоматический пиковый детектор**

Автоматический пиковый детектор служит для выделения как максимального, так и минимального значений огибающей сигнала с выхода УПЧ.

**Детектор выборки**

Детектор выборки служит для выделения одного значения огибающей сигнала с выхода УПЧ в заданный момент времени. Этот момент задается подачей специального стробирующего импульса – *стробимпульса*.

**Детектор среднеквадратического (RMS) значения**

Детектор среднеквадратического значения (RMS) наиболее удобен для представления мощности сигнала. Однако детектор среднеквадратического значения создает сигнал с напряжением:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^2}, \quad (6.2)$$

где  $U_i$  –  $i$ -я выборка сигнала, содержащая  $N$  отсчетов. Если  $N$  – число отсчетов на пиксель сигнала, наблюдаемого на ЖКИ, то тогда значение

$$P = U_{RMS}/R \quad (6.3)$$

характеризует мощность сигнала, наблюдаемого в заданной точке спектра, отображаемого на экране ЖКИ. В данном случае для расчета мощности используется нормирующее сопротивление  $R$ .

Здесь уместно отметить, что у большинства анализаторов спектра основным режимом является именно представление спектра в виде зависимости мощности сигнала от частоты.

**Детектор среднего (AV) значения**

Детектор среднего (average) значения может быть реализован как аналоговый или цифровой детектор. Последний вырабатывает сигнал напряжения:

$$U_{AV} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N U_i. \quad (6.4)$$

Для получения средней мощности достаточно поделить  $U_{AV}$  на нормирующее сопротивление  $R$ .

### ***Квазипиковый детектор***

Квазипиковый детектор – это обычный диодный детектор с определенными временем заряда и разряда фильтрующего конденсатора. Обычно он используется для оценки уровня помех и шумов.

Современный анализатор спектра чаще всего имеет несколько детекторов различного вида, переключаемых с помощью электронного или ручного переключателя. Для спектра синусоидального сигнала выбор того или иного типа детектора не очень критичен. Однако для шума и сложных сигналов выбор типа детектора может существенно влиять на оценку спектра сигнала.

## **6.1.4. Шум анализаторов спектра**

К сожалению, на работу анализаторов спектра существенное влияние оказывает шум, возникающий во входных цепях анализатора, смесителе, гетеродине и в тракте усиления промежуточной частоты. Можно сказать, что шум – это неизбежное зло, которое есть в любой модели анализатора. При этом чем шире динамический диапазон сигналов, спектр которых наблюдается, и чем шире диапазон их частот, тем сильнее наблюдается шум. Обычно он создает весьма заметную и хаотически изменяющуюся шумовую дорожку в нижней части графика спектра, а также ее смещение по вертикали. Шум особенно заметен при логарифмическом масштабе просмотра спектра мощности. Он в конечном счете ограничивает чувствительность анализаторов спектра и их способность строить спектр слабых сигналов.

Шум четырехполосника (например, входного усилителя или каскадов УПЧ) обычно оценивается безразмерной величиной – коэффициентом шума:

$$F = \frac{S_1/N_1}{S_2/N_2}, \quad (6.5)$$

где  $S_1/N_1$  – отношение сигнал/шум на входе четырехполосника, а  $S_2/N_2$  – отношение сигнал/шум на его выходе. Шум-фактор четырехполосника определяется в децибелах:

$$NF = 10 \log(F). \quad (6.6)$$

Узлы высокочастотного тракта анализаторов спектра (входные цепи, входной усилитель, смеситель, каскады УПЧ) включены последовательно. При таком включении  $N$  линейных устройств, каждое из которых характеризуется коэффициентом шума  $F_i$  и коэффициентом передачи (усиления)  $G_i$ , общий коэффициент шума определяется выражением:

$$F_{\text{общ}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_3} + \dots + \frac{F_N}{\prod_{i=1}^{N-1} G_i}. \quad (6.7)$$

Пассивные цепи с потерями (коаксиальные кабели, разъемы, аттенюаторы) также имеют собственные шумы, которые оцениваются как

$$F = 10^{a/10}, \quad (6.8)$$

где  $a = NF$  – вносимое цепью ослабление (дБ).

Максимальная чувствительность анализаторов спектра реализуется при отказе от входного аттенюатора или при установке его ослабления на 0 дБ. Установка ослабления, например на 10 дБ, ведет к увеличению общего шум-фактора – тоже на 10 дБ для нашего примера.

Для оценки чувствительности анализаторов спектра можно использовать параметр – средний уровень индицируемого шума (СУИШ) [190]. При его оценке считается, что шум тракта анализатора спектра является тепловым и подчинен закону Гаусса. При этом спектральная плотность этого шума постоянна в пределах шумовой полосы частот УПЧ  $B_{\text{ш.пч}}$ . СУИШ анализатора спектра соответствует шумовому напряжению, вырабатываемому детектором огибающей:

$$L_{\text{исш}} = 10 \cdot \log \left( \frac{kTB_{\text{ш.пч}}}{10^{-3} \text{ Вт}} \right) + NF_{AC} - 2,5 \text{ дБ}, \quad (6.9)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц – постоянная Больцмана,  $T$  – окружающая температура (в °К),  $NF_{AC}$  – шум-фактор (в дБ), 2,5 дБ – ошибка в определении уровня шума детектором выборки и при усреднении логарифмических выборок.

При нормальной температуре  $T = 290$  °К формула (6.9) выражается в виде:

$$L_{\text{исш}} = -174 \text{ дБ (1 Гц)} + \left( 10 \cdot \log \frac{B_{\text{ш.пч}}}{\text{Гц}} \right) \text{ дБ} + NF_{AC} - 2,4 \text{ дБ}. \quad (6.10)$$

Эта формула позволяет прикинуть чувствительность анализаторов спектра при известной шумовой полосе УПЧ и шумовой полосе

частот  $B_{ш.пч}$ . Нетрудно заметить, что с ростом последней СУИШ возрастает. С этим надо считаться – для получения малого уровня шума неизбежно нужно сужать полосу  $B_{ш.пч}$ .

### 6.1.5. Основные установки в анализаторах спектра

Современные анализаторы спектра имеют ряд специальных установок (настроек), которые стоит указать перед рассмотрением конкретных моделей анализаторов спектра.

#### *Диапазон частот отображаемых спектров*

Следует отличать общий диапазон частот анализатора спектра от диапазона частот спектра, который наблюдается на экране индикатора. Общий диапазон частот определяется как область частот от минимальной частоты до максимальной. Они, в свою очередь, устанавливаются соответствующими частотами гетеродина. Общий диапазон частот даже у широко доступных анализаторов часто лежит в диапазоне частот от 9 кГц (реже от 20 Гц и даже от 0) до нескольких гигагерц.

Есть редкие модели анализаторов спектра, называемые *панорамными измерительными приемниками*, которые позволяют наблюдать спектр сигналов в общем диапазоне частот. Но у широкодиапазонных анализаторов спектра это исключение из правил. Большинство анализаторов спектра позволяют наблюдать спектр сигналов только с ограниченной полосой частот. Она и есть диапазон частот отображаемых спектров.

Диапазон частот отображаемых спектров задается тремя основными способами:

- указанием минимальной  $f_{\min}$  и максимальной  $f_{\max}$  частот;
- указанием средней частоты (Center Frequency) и ее отклонения в обе стороны;
- указанием средней частоты (Center Frequency) и полосы частот обзора спектра (Span).

Многие анализаторы спектра позволяют реализовать любую из этих установок.

#### *Частотный масштаб*

Частотный масштаб (масштаб по горизонтальной оси) определяется отношением диапазона частот отображаемого спектра к числу

больших делений масштабной сети индикатора. Частотный масштаб выражается в Гц/дел, кГц/дел, МГц/дел и т. д.

### ***Диапазон отображаемых уровней сигнала***

Спектр по вертикальной оси представляется уровнями сигнала. Уровень сигнала обычно измеряется мощностью сигнала в микро-вольтах, но чаще задается в децибелах мощности. Напомним, что это величина

$$\text{дБ}_p = 10\log(P/P_0),$$

где  $P_0$  – опорное значение мощности, обычно равное 1 мВт.

Диапазон отображаемых уровней задается опорным уровнем  $P_0$  и размахом уровня. На эту установку влияют наличие входного аттенюатора, который вносит ослабление сигнала, и установка опции предварительного усилителя. Превышение опорного уровня, как правило, недопустимо, поскольку ведет к обрезанию верхушек линий спектра. В этом случае и следует применять входной аттенюатор.

Более глубокий анализ показывает, что радиочастотный тракт анализаторов спектра не является строго линейным. Обычно допустимой является нелинейность в виде отклонения амплитудной характеристики спектра от прямой линии на 1 дБ. Однако в определенных условиях это довольно сильная нелинейность, которая может привести к появлению в спектре линий даже несуществующих гармоник (например, при наблюдении спектра чистого синусоидального сигнала).

### ***Частотное разрешение***

Частотное разрешение анализатора спектра задается формой АЧХ окна. Обычно оно соответствует полосе частот, на границах которой спад АЧХ составляет  $-3$  дБ. Некоторые анализаторы спектра имеют частотное разрешение вплоть до частоты 1 или 10 Гц.

### ***Длительность, или время, развертки***

Этот параметр относится к гетеродинным (супергетеродинным) анализаторам спектра и характеризует время, за которое управляющий пилообразный сигнал меняется от минимального до максимального уровня. При этом частота настройки анализатора меняется от минимальной до максимальной. Таким образом, время развертки определяет скорость изменения частоты и степень динамических искажений АЧХ анализатора спектра.

Здесь уместно отметить, что управление частотой гетеродина с помощью пилообразного сигнала осуществляется только в простейших анализаторах спектра первого поколения. У современных анализаторов нарастание частоты гетеродина по линейному или логарифмическому закону осуществляется с помощью синтезаторов частоты. При этом используется или непосредственно синтезируемая частота, или частота гетеродина, снабженного системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

### *Другие установки (настройки)*

Разумеется, современный анализатор спектра имеет и массу других установок, например выбор режимов работы (обычно с помощью меню), включение и выключение входного аттенюатора, установку маркеров в заданные точки графика спектра, установку яркости и контрастности экрана индикатора и др. С полным набором установок можно познакомиться в инструкции по применению выбранной модели анализатора спектра.

## **6.1.6. Гетеродинный анализатор спектра АКС-1100/1101**

Примером анализатора спектра гетеродинного типа, выполненного на аналоговых компонентах, является анализатор спектра АКТАКОМ АКС-1100/1101 [191]. Этот сравнительно дешевый анализатор дожил до наших дней и до сих пор продается. Функциональная схема анализатора показана на рис. 6.4.

Как видно по рис. 6.4, анализатор построен по схеме тройного преобразования частоты. Это обеспечивает достаточно широкий диапазон средних частот от 1 до 1000 МГц. Последнее достигается перестройкой первого гетеродина в диапазоне частот от 2 до 3 ГГц. Первая промежуточная частота выбрана равной 2 ГГц, а частота второго гетеродина равна 1,9 ГГц. После второго преобразования спектр частот смещается к частоте 100 МГц, так что частота третьего гетеродина, равная 100 МГц, обеспечивает просмотр спектра с полосой частот до 1 МГц. Ширина полосы просмотра составляет величину от 10 кГц до 1 МГц, так что для детального анализа спектра с высоким разрешением этот анализатор спектра не приспособлен.

В тракте усиления преобразованного сигнала имеется логарифмический усилитель, что обеспечивает логарифмический масштаб отображения спектра по амплитуде (шкала в децибелах). Фильтр-

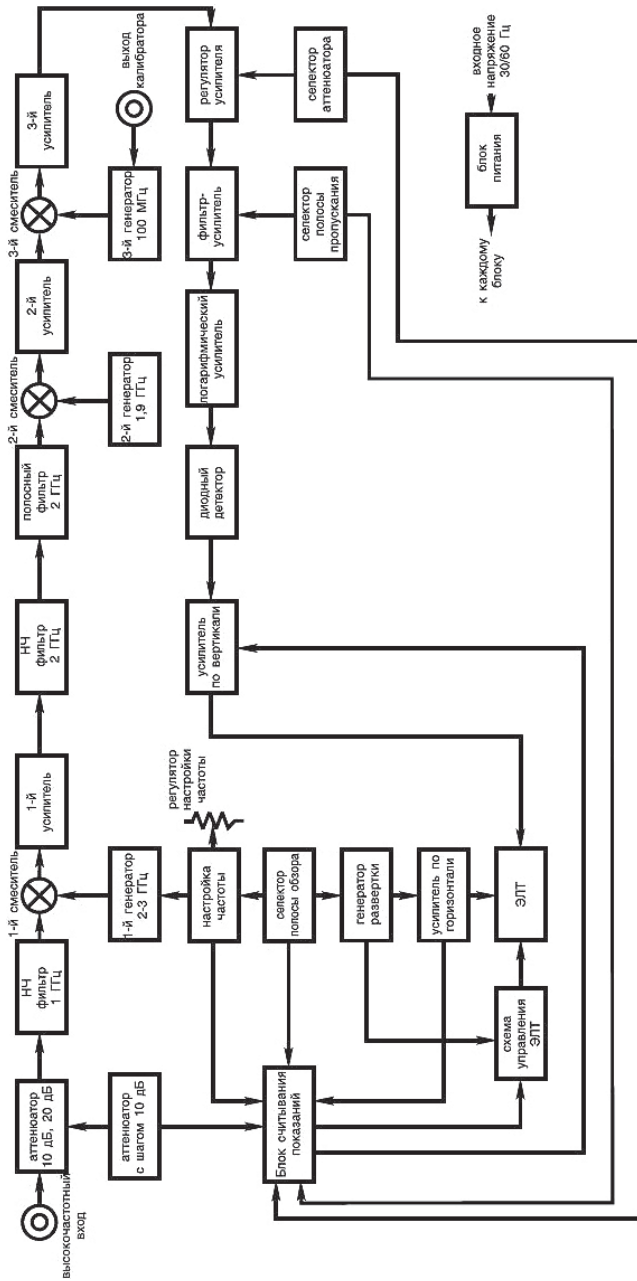


Рис. 6.4. Функциональная схема гетеродинного анализатора спектра АКС-1101

усилитель имеет регулируемую полосу частот, что позволяет реализовать различное частотное разрешение анализатора. Сигнал третьего гетеродина с частотой 100 МГц используется и как калибровочный сигнал с уровнем  $-80 \text{ дБ}_{\text{мкВ}}$ .

Внешний вид анализатора спектра АКТАКОМ АКС-1101 показан на рис. 6.5. Прибор имеет достаточно малые габариты и вполне современный вид, что положительно отличает его от первого поколения анализаторов спектра – громоздких и тяжелых приборов, нередко состоящих из нескольких крупных блоков.

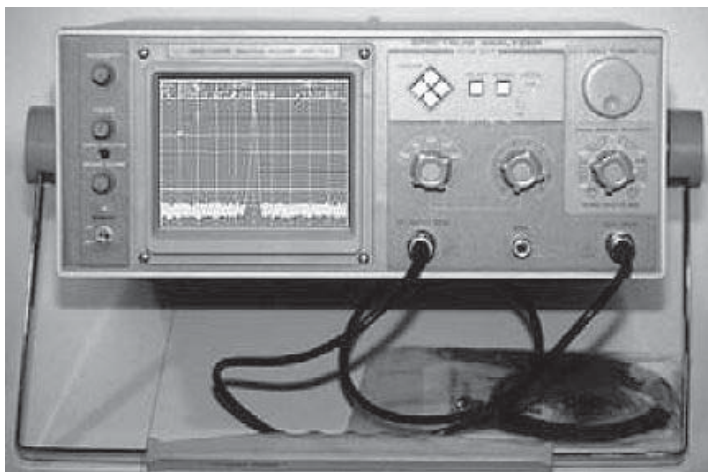


Рис. 6.5. Внешний вид анализатора спектра АКТАКОМ АКС-1101

Экран с его спектром синусоидального сигнала показан на рис. 6.6. По рисунку видно, что в верхней части экрана отображается числовая информация о полосе частот, центральной полосе, масштабах по вертикали и горизонтали. На экране видны также перемещаемые маркеры, с помощью которых можно провести маркерные измерения характерных параметров спектра, например амплитуды и частоты отображаемой спектральной линии.

Хорошо видно, что спектральная линия синусоидального сигнала имеет вид резонансной кривой с пиком и спадами по обе стороны от него. Уровень пика определяет уровень гармоники (в данном случае только первой), а положение пика по горизонтали – частоту гармоники. Разрешающая способность по частоте такого анализатора невелика и определяется полосой просмотра, которую можно менять.