

Первая в России монография по самым современным электронным электро- и радиоизмерениям и измерительным приборам, применяемым в научных исследованиях, тестировании и испытании устройств и систем микроэлектроники и нанотехнологий. Впервые подробно описаны средства измерений, применяемые в условиях крупносерийного микроэлектронного производства, и приборы ведущих в их разработке и производстве фирм: Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, LeCroy, R&S и др. Особое внимание уделено анализу и генерации тестовых сигналов, измерению их параметров в области малых и сверхмалых времен, измерению сверхмалых токов и напряжений, анализу импеданса и иммитанса цепей, измерениям статических и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и др. Является самым крупным обзором современных зарубежных и отечественных измерительных приборов на рынке России и мира.

Для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.

Интернет-магазин:
www.aliants-kniga.ru

Книга - почтой:
Россия, 123242, Москва, а/я 20
books@aliants-kniga.ru

Оптовая продажа:
"Альянс-книга". Тел.: (495)258-9195
book@aliants-kniga.ru

ISBN 978-5-94074-626-3

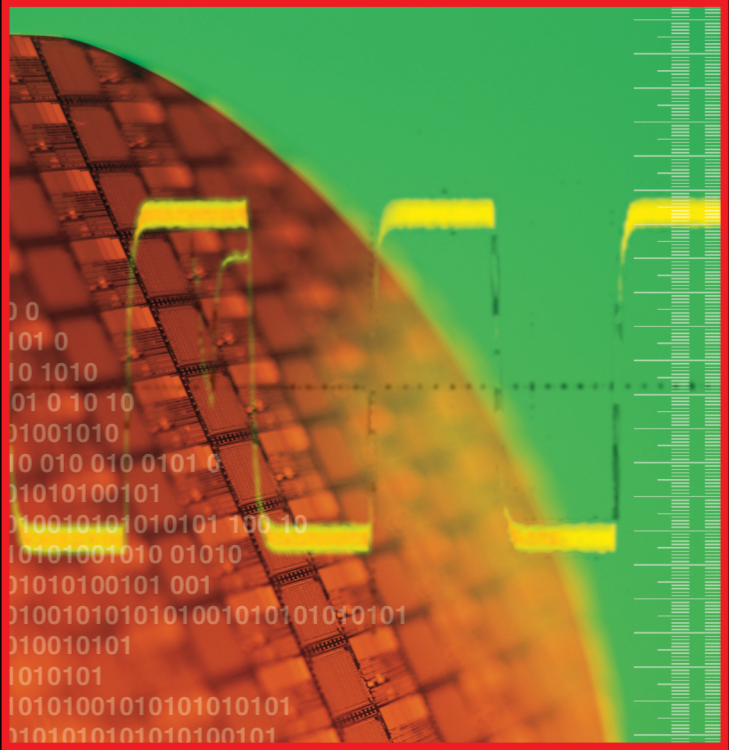


9 785940 746263 >



ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ
И В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ
И В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ



Афонский А. А.
Дьяконов В. П.

А. А. Афонский, В. П. Дьяконов

Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике

Под редакцией проф. В. П. Дьяконова

Издание рекомендовано в качестве учебного пособия
для студентов технических вузов



Москва, 2011

УДК 621.3.049.77:621.3.08

ББК 32.844.1+31.221

А94

Афонский А. А., Дьяконов В. П.
А94 Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.

ISBN 978-5-94074-626-3

Первая в России монография по самым современным электронным электро- и радиоизмерениям и измерительным приборам, применяемым в научных исследованиях, тестировании и испытании устройств и систем микроэлектроники и нанотехнологий. Впервые подробно описаны средства измерений, применяемые в условиях крупносерийного микроэлектронного производства, и приборы ведущих в их разработке и производстве фирм: Keithley, Tektronix, Agilent Technologies, LeCroy, R&S и др. Особое внимание уделено анализу и генерации тестовых сигналов, измерению их параметров в области малых и сверхмалых времен, измерению сверхмалых токов и напряжений, анализу импеданса и иммитанса цепей, измерениям статических и динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и др. Является самым крупным обзором современных зарубежных и отечественных измерительных приборов на рынке России и мира. Для инженеров, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов вузов и университетов технического и классического типов.

УДК 621.3.049.77:621.3.08

ББК 32.844.1+31.221

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 978-5-94074-626-3

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

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Предисловие..... | 13 |
| Благодарности и адреса для переписки | 15 |

▼ 1

| | |
|--|----|
| Средства и объекты нанотехнологий..... | 16 |
| 1.1. Переход от микротехнологии к нанотехнологии | 16 |
| 1.1.1. От механических часов к микропроцессору | 16 |
| 1.1.2. Закон Мура и падение 100-нм барьера..... | 19 |
| 1.2. Электронная и рентгеновская микроскопия..... | 19 |
| 1.2.1. Отличия электронной микроскопии от оптической..... | 19 |
| 1.2.2. Типы электронных микроскопов | 21 |
| 1.2.3. Сферы применения электронных микроскопов..... | 23 |
| 1.2.4. Рентгеноскопия интегральных микросхем | 25 |
| 1.3. Компоненты интегральных микросхем | 27 |
| 1.3.1. Компоненты микросхем – пассивные и активные | 27 |
| 1.3.2. Полевые транзисторы – кирпичики интегральных микросхем | 27 |
| 1.3.3. Интегральные микромощные полевые транзисторы | 29 |
| 1.3.4. Терагерцовые полевые транзисторы..... | 30 |
| 1.3.5. Сверхскоростные гетеропереходные Si-Ge биполярные транзисторы | 33 |
| 1.3.6. Трехзатворные полевые транзисторы | 35 |
| 1.3.7. Нужны ли мощные транзисторы?..... | 38 |
| 1.4. Интегральные микросхемы..... | 38 |
| 1.4.1. Типы интегральных микросхем..... | 38 |
| 1.4.2. Процесс изготовления интегральных микросхем | 40 |
| 1.4.3. Микропроцессоры – от одноядерных к многоядерным..... | 46 |
| 1.4.4. Парадоксы микроэлектронной технологии..... | 49 |
| 1.4.5. От алюминия к меди | 52 |
| 1.4.6. Фотолитография с ультракороткими лучами – прорыв в будущее..... | 53 |
| 1.4.7. Тестирование и отладка микросхем | 55 |
| 1.4.8. Начало нанотехнологий в микроэлектронике | 57 |
| 1.5. Чудеса нанотехнологий | 58 |
| 1.5.1. Электромеханика на кремниевом кристалле (MEMS)..... | 58 |
| 1.5.2. Проекционный дисплей и гибкие экраны | 59 |
| 1.5.3. Нанотрубки | 61 |
| 1.5.4. Подключение нанотрубок к МДП-микротранзистору | 63 |

4 Содержание

| | |
|--|----|
| 1.5.5. Галлиевый «градусник» на углеродной нанотрубке | 63 |
| 1.5.6. Твердотельная память вместо жестких дисков | 64 |
| 1.5.7. Нанотехнологии повышают мощность химических элементов | 65 |
| 1.5.8. Нанороботы и наноавтомобили..... | 66 |
| 1.5.9. Нанотехнологии в производстве новых материалов | 69 |
| 1.5.10. Полупроводниковые микролазеры | 70 |
| 1.6. От фантастики к практике | 72 |

▼ 2

| | |
|--|-----|
| Измерения на постоянном токе | 73 |
| 2.1. Основные компоненты электронных схем | 73 |
| 2.1.1. Пассивные и активные компоненты (обзор)..... | 73 |
| 2.1.2. Источники напряжения и тока | 74 |
| 2.1.3. Погрешность измерения постоянного напряжения | 75 |
| 2.1.4. Измерения в произвольных цепях постоянного тока | 76 |
| 2.1.5. Резистивные компоненты (резисторы)..... | 77 |
| 2.1.6. Комплекс приборов для измерений в микроэлектронике и в нанотехнологиях..... | 78 |
| 2.2. Источники электропитания и их имитаторы | 80 |
| 2.2.1. Первичные и вторичные источники электропитания | 80 |
| 2.2.2. Имитаторы батарей..... | 81 |
| 2.2.3. Высоковольтные источники питания | 83 |
| 2.2.4. Высоковольтные источники питания/измерители | 85 |
| 2.2.5. Электронные нагрузки..... | 88 |
| 2.2.6. Калибраторы измерителей напряжения и тока..... | 91 |
| 2.3. Измерение параметров резистивных компонентов..... | 92 |
| 2.3.1. Измерение резистивности и проводимости | 92 |
| 2.3.2. Измерители больших и малых сопротивлений | 95 |
| 2.3.3. Методы измерения удельного сопротивления и типа полупроводников | 98 |
| 2.3.4. Измеритель удельного сопротивления полупроводников ПИММАР-1У..... | 100 |
| 2.3.5. Комплекс измерения больших удельных сопротивлений Keithley 65 | 101 |
| 2.3.6. Электронметр и измеритель высокоомных сопротивлений Keithley 6517A..... | 102 |
| 2.3.7. Измерения экстремальных (высоких и низких) сопротивлений..... | 104 |
| 2.3.8. Определение типа проводимости полупроводников | 106 |
| 2.4. Измерение сверхмалых постоянных токов и напряжений | 107 |
| 2.4.1. Физические эффекты, ведущие к генерации сверхмалых токов и напряжений..... | 107 |
| 2.4.2. Методы измерения сверхмалых токов и напряжений | 109 |
| 2.4.3. Мультиметры с расширенными пределами измерения | 112 |
| 2.4.4. Микровольтметры и нановольтметры | 123 |
| 2.4.5. Методы повышения точности измерений сверхмалых напряжений, токов и сопротивлений..... | 126 |
| 2.4.6. Измерение температуры..... | 128 |
| 2.5. Аксессуары, опции и средства интеграции приборов..... | 129 |
| 2.5.1. Выбор аксессуаров для измерительных приборов | 129 |
| 2.5.2. Опции для измерительных приборов..... | 130 |
| 2.5.3. Средства интеграции измерительных приборов | 132 |
| 2.6. Анализатор/источник постоянных напряжений Agilent N6705A..... | 134 |
| 2.6.1. Назначение и конструкция прибора | 134 |
| 2.6.2. Отображаемая дисплеем информация | 135 |
| 2.6.3. Генератор испытательных сигналов | 136 |
| 2.6.4. Применение прибора | 137 |

▼ 3

| | |
|--|-----|
| Измерения на переменном токе | 138 |
| 3.1. Основные параметры переменного напряжения и тока | 138 |
| 3.1.1. Параметры синусоидального напряжения и тока | 138 |
| 3.1.2. Истинное среднеквадратическое значение (True RMS) | 140 |
| 3.1.3. Коэффициент нелинейных искажений (гармоник) | 142 |
| 3.2. Измерение параметров переменного напряжения и тока | 142 |
| 3.2.1. Принципы построения измерителей переменных токов и напряжений | 142 |
| 3.2.2. Принципы построения измерителей с истинным среднеквадратическим значением | 143 |
| 3.2.3. Измерение переменных токов и напряжений мультиметрами | 146 |
| 3.2.4. Измерители коэффициента гармоник | 148 |
| 3.2.5. Измерители частоты, периода и фазы | 150 |
| 3.2.6. Профессиональные цифровые частотомеры фирмы Pendulum | 152 |
| 3.2.7. Измерители мощности ВЧ- и СВЧ-сигналов | 154 |
| 3.3. Параметры реактивных компонентов и цепей с ними | 155 |
| 3.3.1. Идеальная индуктивность | 155 |
| 3.3.2. Идеальная емкость | 156 |
| 3.3.3. Иммитанс, адмитанс и импеданс цепей | 157 |
| 3.4. Измерение параметров реактивных компонентов | 158 |
| 3.4.1. Измерение емкости и индуктивности | 158 |
| 3.4.2. Общий обзор цифровых измерителей иммитанса и импеданса | 160 |
| 3.4.3. Цифровой измеритель иммитанса E7-20 | 161 |
| 3.4.4. Малогабаритный измеритель иммитанса E7-25 | 165 |
| 3.4.5. Работа с измерителем иммитанса E7-20 | 166 |
| 3.4.6. Широкодиапазонные RLC-измерители АКТАКОМ AM-3001, AM-3018 и AM-3026 | 168 |
| 3.4.7. Лабораторные LCR-измерители компании Good Will | 171 |
| 3.4.8. Лабораторные LCR-измерители АКИП серии 61** | 173 |
| 3.4.9. Высокочастотные LCR-измерители фирмы WK | 174 |

▼ 4

| | |
|---|-----|
| Измерительные генераторы сигналов | 178 |
| 4.1. Аналоговые генераторы синусоидальных сигналов | 178 |
| 4.1.1. Основные типы аналоговых генераторов синусоидального напряжения | 178 |
| 4.1.2. Обобщенная схема аналогового генератора синусоидального напряжения | 179 |
| 4.1.3. RC-генераторы | 181 |
| 4.1.4. LC-генераторы синусоидального напряжения | 182 |
| 4.1.5. Кварцевые резонаторы и генераторы | 183 |
| 4.1.6. Эталонные генераторы синусоидального напряжения | 186 |
| 4.1.7. LC-генераторы стандартных сигналов (ГСС) | 187 |
| 4.2. Основы цифрового синтеза частоты и формы сигналов | 188 |
| 4.2.1. Основные методы цифрового синтеза синусоидальных сигналов | 188 |
| 4.2.2. Цифровой частотный синтез | 188 |
| 4.2.3. Генераторы произвольных функций (AFG) | 189 |
| 4.2.4. Генераторы сигналов произвольной формы (AWG) | 190 |
| 4.2.5. Шум квантования у генераторов с цифровым синтезом формы сигналов | 191 |
| 4.2.6. Фазовый шум генераторов | 193 |

| | |
|--|-----|
| 4.3. ГСС с цифровым синтезом умеренной сложности | 194 |
| 4.3.1. Простые ВЧ- и СВЧ-генераторы с цифровым синтезом | 194 |
| 4.3.2. ГСС с цифровым синтезом фирмы Agilent Technologies..... | 196 |
| 4.3.3. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы ROHDE&SCHWARE | 199 |
| 4.4. Векторные генераторы синусоидальных сигналов | 202 |
| 4.4.1. Векторное представление сигналов и цифровая модуляция..... | 202 |
| 4.4.2. Векторные генераторы фирмы Agilent Technologies..... | 203 |
| 4.4.3. Векторные генераторы фирмы R&S | 204 |
| 4.4.4. Векторные генераторы фирмы Keithley..... | 206 |
| 4.5. Импульсные сигналы и принципы их генерации | 208 |
| 4.5.1. Формы и параметры импульсов..... | 208 |
| 4.5.2. Спектр импульсных сигналов | 210 |
| 4.5.3. Схемотехника импульсных генераторов | 212 |
| 4.5.4. Типичная функциональная схема генератора импульсов | 216 |
| 4.5.5. Отечественные серийные генераторы импульсов..... | 217 |
| 4.5.6. Зарубежные промышленные генераторы импульсов | 222 |
| 4.6. Генераторы импульсов сверхмалой длительности | 223 |
| 4.6.1. Принципы генерации импульсов с субнаносекундным временем нарастания | 223 |
| 4.6.2. Генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами | 224 |
| 4.6.3. Генераторы пикосекундных импульсов фирмы Picosecond Pulse Lab | 226 |
| 4.7. Аналоговые функциональные генераторы | 228 |
| 4.7.1. Основные типы функциональных генераторов | 228 |
| 4.7.2. Функциональные генераторы с интегратором на интегральном операционном усилителе | 229 |
| 4.7.3. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током..... | 230 |
| 4.7.4. Микросхемы для аналоговых функциональных генераторов | 231 |
| 4.7.5. Отечественные аналоговые функциональные генераторы..... | 232 |
| 4.7.6. Функциональные генераторы зарубежных фирм..... | 234 |
| 4.8. Функциональные генераторы с цифровым синтезом выходных сигналов..... | 237 |
| 4.8.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов | 237 |
| 4.8.2. Цифровые функциональные генераторы зарубежных фирм..... | 238 |
| 4.9. Генераторы серии AFG3000 компании Tektronix | 243 |
| 4.9.1. Внешний вид и работа с генераторами серии AFG3000..... | 243 |
| 4.9.2. Технические характеристики генераторов AFG3000 | 245 |
| 4.9.3. Работа с генератором AFG3000 | 246 |
| 4.9.4. Основные возможности генераторов AFG3000 | 248 |
| 4.9.5. Применение AFG3000 в роли ГКЧ и Q-метра..... | 252 |
| 4.9.6. Применение AFG3000 в роли импульсного генератора | 254 |
| 4.10. Программное обеспечение генераторов AFG3000..... | 258 |
| 4.10.1. Назначение программы ArbExpress и ее интерфейс | 258 |
| 4.10.2. Создание сигналов стандартных форм | 259 |
| 4.10.3. Настройка на типы приборов и работа с файлами..... | 260 |
| 4.10.4. Программирование формы сигналов..... | 262 |
| 4.10.5. Применение графического редактора формы сигналов | 266 |
| 4.10.6. Математические операции с сигналами | 267 |
| 4.10.7. Построение сигнала по осциллограмме | 268 |
| 4.10.8. Управление генераторами от системы MATLAB..... | 270 |
| 4.11. Программа NI Signal Express Tektronix Edition..... | 272 |
| 4.11.1. Назначение программы..... | 272 |
| 4.11.2. Выбор и запуск программы..... | 272 |

| | |
|--|-----|
| 4.11.3. Окно выбора инструмента (прибора) | 274 |
| 4.11.4. Работа с генератором серии AFG3000 | 274 |
| 4.11.5. Дополнительные возможности программы | 275 |
| 4.12. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG | 276 |
| 4.12.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG | 276 |
| 4.12.2. Генераторы серии AWG7000 | 277 |
| 4.12.3. Генераторы серии AWG5000 | 278 |
| 4.13. Генераторы цифровых сигналов произвольной формы (паттернов) | 279 |
| 4.13.1. Функциональная схема генератора паттернов данных | 279 |
| 4.13.2. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG2020A | 280 |
| 4.13.3. Генераторы цифровых сигналов Tektronix DG5078/5274/DTG5334 | 281 |
| 4.13.4. Генератор импульсов/паттернов серии 3400 фирмы Keithley | 282 |

▼ 5

| | |
|--|-----|
| Современные электронные осциллографы | 284 |
| 5.1. Закат аналоговой осциллографии | 284 |
| 5.1.1. Основные типы электронных осциллографов | 284 |
| 5.1.2. Достоинства и недостатки аналоговых осциллографов | 285 |
| 5.1.3. Требования к усилителям осциллографов | 287 |
| 5.1.4. Широкополосные аналоговые осциллографы AKTAKOM-IWATSU с обычной ЭЛТ | 291 |
| 5.1.5. Широкополосные аналоговые осциллографы AKTAKOM-IWATSU со сканирующей ЭЛТ | 292 |
| 5.2. Основы построения и работы цифровых запоминающих осциллографов | 295 |
| 5.2.1. Блок-схема цифрового запоминающего осциллографа | 295 |
| 5.2.2. О выборе числа отсчетов, восстановлении и интерполяции сигналов | 297 |
| 5.2.3. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов | 299 |
| 5.3. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы | 301 |
| 5.3.1. Какие из цифровых осциллографов можно отнести к бюджетным | 301 |
| 5.3.2. Массовые цифровые осциллографы юго-восточных фирм | 301 |
| 5.3.3. Массовые цифровые осциллографы фирмы RIGOL | 305 |
| 5.4. Цифровые осциллографы компании Tektronix | 306 |
| 5.4.1. Цифровые осциллографы фирмы Tektronix закрытой архитектуры | 306 |
| 5.4.2. Цифровые осциллографы Tektronix с открытой архитектурой | 313 |
| 5.4.3. Технические новинки в осциллографах фирмы Tektronix | 319 |
| 5.5. Цифровые осциллографы фирмы LeCroy | 325 |
| 5.5.1. Цифровые осциллографы LeCroy с полосой до 500 МГц | 325 |
| 5.5.2. Цифровые осциллографы LeCroy среднего класса | 328 |
| 5.5.3. Цифровые осциллографы LeCroy высшего класса | 330 |
| 5.6. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies | 336 |
| 5.6.1. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы Agilent | 336 |
| 5.6.2. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies среднего класса | 337 |
| 5.6.3. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies высшего класса | 340 |
| 5.7. Стробоскопические осциллографы | 345 |
| 5.7.1. Принципы построения стробоскопических осциллографов | 345 |
| 5.7.2. Генераторы стробирующих импульсов | 346 |
| 5.7.3. Устройства выборки сигналов | 347 |
| 5.7.4. Отечественные стробоскопические осциллографы | 348 |
| 5.7.5. Стробоскопический осциллограф ПК C1-24 | 350 |
| 5.7.6. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц | 352 |

▼ 6

| | |
|---|-----|
| Искусство осциллографии..... | 354 |
| 6.1. Аксессуары осциллографов и их применение..... | 354 |
| 6.1.1. Назначение пробников..... | 354 |
| 6.1.2. Пробники на основе компенсированного делителя..... | 355 |
| 6.1.3. Высоковольтные пробники..... | 358 |
| 6.1.4. Пробники с коррекцией частотной характеристики..... | 359 |
| 6.1.5. Учет параметров пробников..... | 361 |
| 6.1.6. Подключение пробников к источникам сигналов..... | 364 |
| 6.1.7. Эволюция конструкции осциллографических пробников..... | 365 |
| 6.1.8. Пробники с оптической развязкой..... | 366 |
| 6.1.9. Токовые пробники..... | 367 |
| 6.1.10. Новейшие пробники Tektronix класса TekConnect™ и TekVPI™..... | 369 |
| 6.2. Согласованные широкополосные устройства..... | 371 |
| 6.2.1. Согласованные пассивные пробники и кабели..... | 371 |
| 6.2.2. О выборе входного сопротивления у осциллографов..... | 371 |
| 6.2.3. Коаксиальные аттенюаторы, переходники и тройники..... | 374 |
| 6.3. Активные осциллографические пробники..... | 375 |
| 6.3.1. Назначение современных активных пробников..... | 375 |
| 6.3.2. Широкополосные активные пробники..... | 377 |
| 6.3.3. Дифференциальные пробники..... | 380 |
| 6.3.4. Конфигурация измерительной головки пробников..... | 381 |
| 6.3.5. Сверхширокополосные дифференциальные пробники..... | 383 |
| 6.4. Специальные устройства подключения и фиксации пробников..... | 385 |
| 6.4.1. Применение для подключения пробников механических манипуляторов..... | 385 |
| 6.4.2. Станция 2020H/V фирмы Probing Solution, Inc..... | 385 |
| 6.5. Импульсная рефлектоскопия и рефлектометрия..... | 386 |
| 6.5.1. Основные положения импульсной рефлектометрии..... | 386 |
| 6.5.2. Расшифровка рефлектограмм..... | 387 |
| 6.5.3. Цифровой осциллограф в роли рефлектометра..... | 388 |
| 6.6. Спектральный анализ с помощью цифровых осциллографов..... | 389 |
| 6.6.1. Основы оконного спектрального анализа..... | 389 |
| 6.6.2. Выбор окна при спектральном анализе..... | 391 |
| 6.6.3. Спектральный анализ у простых осциллографов..... | 392 |
| 6.6.4. Спектральный анализ у осциллографов DPO 4000..... | 395 |
| 6.6.5. Спектральный анализ у осциллографов TDS 5000..... | 400 |
| 6.6.6. Спектральный анализ у осциллографов DPO 7000..... | 401 |
| 6.6.7. Спектральный анализа у осциллографов других фирм..... | 403 |
| 6.7. Другие возможности современных осциллографов..... | 405 |
| 6.7.1. Режимы выборок и пик-детектор..... | 405 |
| 6.7.2. Опорные осциллограммы..... | 406 |
| 6.7.3. Расчетные осциллограммы и математический редактор..... | 407 |
| 6.7.4. Глазковые диаграммы..... | 408 |
| 6.8. Применение системы MATLAB..... | 410 |
| 6.8.1. Компьютерная математика в измерительной технике..... | 410 |
| 6.8.2. Подключение к ПК цифрового осциллографа..... | 412 |
| 6.8.3. Стыковка цифрового осциллографа с системой MATLAB..... | 412 |
| 6.8.4. Программа ввода в MATLAB осциллограмм двух каналов..... | 418 |
| 6.9. Математические операции с сигналами..... | 420 |
| 6.9.1. Математические операции с сигналами двух каналов..... | 420 |