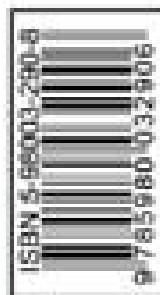


Афонский А. А., Дьяконов В. П.

Измерительные приборы и массовые электронные измерения



Специфика измерений
Современные мультиметры
Источники напряжений и токов
Все виды осциллографов
Лаборатории на компьютере
Паяльное оборудование

Пехова для специалиста!



УДК 621.38
ББК 32.85
А 94

А. А. Афонский, В. П. Дьяконов

Д93 Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Серия «Библиотека инженера». Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. — 544 с.: ил.

ISBN 5-98003-290-8

Описаны самые современные измерительные приборы: измерители R, C и L, мультиметры, измерительные ВЧ- и НЧ-генераторы, импульсные и функциональные генераторы, аналоговые и цифровые стационарные и портативные осциллографы, в том числе уникальные. Особое внимание уделено массовым дешевым (бюджетным) приборам и технике измерений, в том числе с применением виртуальных и компьютеризированных лабораторий, и их применению в практике электронных измерений. Ряд материалов посвящен работе с современными цифровыми осциллографами и функциональными генераторами. Рассмотрена современная элементная база и схемотехника измерительных устройств. В книге около шестисот иллюстраций и осциллограмм. Для работников служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, научных работников и инженеров, студентов, аспирантов, преподавателей и лаборантов вузов и университетов, а также для подготовленных радиолюбителей.

www.solon-press.ru
E-mail: solon-avtor@coba.ru

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Оформить заказ можно на сайте **www.solon-press.ru** в разделе «Книга — почтой».

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса **www.solon-press.ru/kat.doc**.

Интернет-магазин размещен на сайте **www.solon-press.ru**.

По вопросам приобретения обращаться:
ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»
Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, **www.abook.ru**

ISBN5-98003-290-8

© Макет и обложка «СОЛОН-ПРЕСС», 2010
© А. А. Афонский, В. П. Дьяконов, 2010

Глава 1. Основы электронных измерений и мультиметры

В этой главе описаны самые массовые виды электро- и радиоизмерений: измерение сопротивления R , емкости C и индуктивности L пассивных компонентов, добротности и тангенса угла потерь, измерение постоянного и переменного напряжений токов (включая истинные среднеквадратические значения переменного напряжения и тока) и частоты сигналов. Подробно описаны мультиметры — приборы для измерения этих параметров, в том числе подключаемые к компьютеру через порты RS-232 и USB. Рассмотрена их современная элементная база.

1.1. Измерения на постоянном токе

1.1.1. Источники напряжения и тока

Любое электронное устройство строится на основе электронных компонентов. Прежде всего, это источники электрической энергии, активные приборы (например, транзисторы и интегральные схемы), диоды, резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.

Источники электрической энергии представлены источниками напряжения и тока. Реальный источник напряжения можно описать эквивалентной схемой (рис. 1.1,а), содержащей последовательно включенные источник электродвижущей силы (ЭДС) E и внутреннюю резистивность R_i . Сразу же отметим, что термин «*резистивность*» у нас не привился и многие предпочитают более привычный термин «*сопротивление*», так что R_i — внутреннее сопротивление. В тоже время «сопротивление», как деталь электронных схем, стали называть резистором.

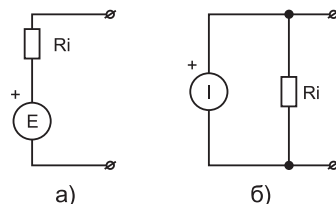


Рис. 1.1. Эквивалентные схемы реального источника постоянного напряжения (а) и тока (б)

Строго говоря, внутренне сопротивление — комплексная величина. Но пока 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 вольтамперной характеристикой — *негатроны*). Но в дальнейшем мы ограничимся представлением R_i как сопротивления постоянного (линейного).

Самое широкое распространение, особенно при питании мобильной и малогабаритной электронной аппаратуры получили первичные источники постоянного напряжения — батареи из гальванических элементов и аккумуляторные батареи. Отдельный элемент таких батарей имеет ЭДС от 1,2 до 2,5 В при R_i порядка долей — единиц Ома. Широко применяются и всевозможные вторичные источники напряжения постоянного тока — от простых нестабилизированных выпрямителей до лабораторных источников питания с регулируемыми и высокостабильными напряжениями. Они рассматриваются далее в главе 1.

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 необходимостью 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. У идеального источника постоянного напряжения $R_i=0$, а у реального источника тока $R_i=\infty$.

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 В 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.

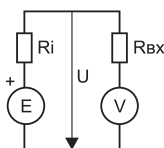


Рис. 1.2. Измерение ЭДС первичного источника напряжения постоянного тока

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, отсутствия 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 $U_{и}$:

$$\Delta_U = U - U_{и}.$$

Относительная погрешность есть отношение абсолютной погрешности к идеальному значению параметра — напряжение:

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{U_{и}} = \frac{U - U_{и}}{U_{и}}.$$

Однако, задание относительной погрешности таким образом неудобно, поскольку она относится к каждому конкретному значению U_i . Поэтому чаще задается погрешность относительно верхнего предела измеряемого напряжения $U_{\text{ИМАКС}}$:

$$\delta_{U_{\text{ИМАКС}}} = \frac{U - U_i}{U_{\text{ИМАКС}}}.$$

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

$$U = E \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_i + R_{\text{ВХ}}},$$

а абсолютная погрешность измерения напряжения, вызванная конечным R_i ,

$$\Delta_U = E - U = E \left(1 - \frac{R_{\text{вх}}}{R_i + R_{\text{вх}}} \right).$$

Относительная погрешность,

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{E} = \frac{R_i}{R_i + R_{\text{вх}}}. \quad (1.1)$$

Пример: электронным вольтметром с $R_{\text{вх}}=1$ МОм измеряется ЭДС цилиндрического аккумулятора $E=1,25$ В. Если внутреннее сопротивление аккумулятора равно $R_i=0,25$ Ом, то показания вольтметра согласно (1.1) будут $U = 1.2499996875$ В, абсолютная погрешность из-за конечности R_i $\Delta_U=3.125 \cdot 10^{-7}$ и относительная погрешность $\Delta_U=2.5 \cdot 10^{-7}$.

Практически у всех современных электронных вольтметров входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ больше R_i на несколько порядков (см. пример выше), так что практически $U=E_{\text{вх}}$ и оценка погрешности от конечного значения $R_{\text{вх}}$ (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.

1.1.2. Резисторы и резистивность

Одним из самых распространенных компонентов электрических и электронных цепей и устройств являются линейные резисторы. Они характеризуются резистивностью или сопротивлением R , которое определяется как отношение падения напряжения на резисторе U к протекающему через него току I . Таким образом, $R=U/I$.

Строго говоря, все резисторы в той или иной мере являются нелинейными. Например, проволочные резисторы при протекании через них тока разогреваются и их сопротивление незначительно меняется. У пленочных и полупроводниковых резисторов нелинейность проявляется еще сильнее. Тем не менее, здесь рассматриваются линейные резисторы у которых отклонение от линейности обычно меньше погрешности измерений.

Простейший способ измерения R основан на подключении резистора к источнику напряжения E и измерению протекающего через резистор тока. Однако шкала при этом получается нелинейной (обратно пропорциональной R , поскольку $R=U/I$). Применяются также известные мостовые схемы для измерения сопротивления. К сожалению, и они имеют нелинейную шкалу, неприемлемую для цифровых приборов.

В современных цифровых приборах измерения основаны на пропускании через резистор R неизменного и стабильного тока I . Тогда напряжение на резисторе $U=RI$ и пропорционально сопротивлению R . Напряжение обычно измеряется достаточно точным цифровым вольтметром с большим входным сопротивлением.

1.1.3. Измерения в произвольных цепях 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).

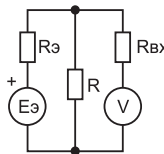


Рис. 1.3. Эквивалентная схема измерения напряжения U на резисторе R произвольной цепи постоянного тока

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:

$$U = E_э \frac{R \parallel R_{вх}}{R_э + R \parallel R_{вх}} = E_э \frac{R_э}{R_э + R_э}, \text{ где } R_э = R \parallel R_{вх} = \frac{R \cdot R_{вх}}{R + R_{вх}}$$

Пример: внешняя цепь имеет $E_s=10$ В и $R_s=10$ кОм. Вычислить напряжение на $R=100$ кОм, если оно измеряется электронным вольтметром с $R_{вх}=10$ МОм. Вначале вычислим $R_s=9.9 \cdot 10^{-4}$. Тогда $U=9.083$ В. И так в данном случае напряжение на резисторе R почти на 1 В меньше напряжения E_s . Отсюда вытекает желательность применения вольтметров с как можно большим входным сопротивлением. Это обеспечивают только электронные вольтметры.

Измерители мощности постоянного тока P практического применения не нашли, поскольку такая мощность легко измеряется по проходящему через резистор R току I или по падению напряжения U на резисторе:

$$P=R \cdot I^2 \text{ или } P=U^2/R.$$

Физически мощность трактуется как скорость изменение энергии во времени. В цепях постоянного тока это изменение происходит с постоянной скоростью, так что мощность является константой.

1.2. Измерения переменного напряжения и тока

1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока

Самое широкое применение нашли синусоидальные переменные напряжения (рис. 1.4) и токи:

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

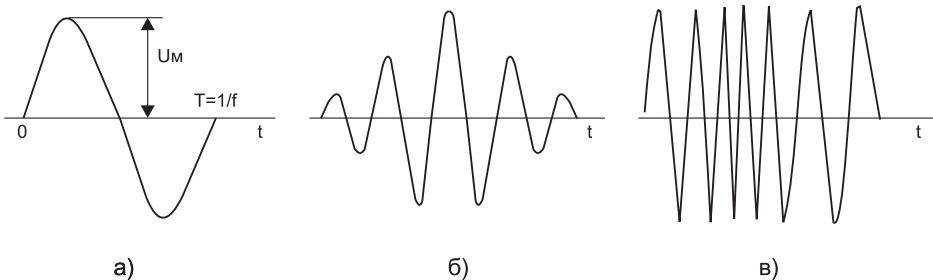


Рис. 1.4. Временная зависимость синусоидального сигнала: а — один период сигнала, б — амплитудно-модулированный сигнал и в — частотно модулированный сигнал

Их временные зависимости 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 компонент (L и C) цепей, а также с работой различных фазосдвигающих цепей, например фазоинверторов и трансформаторов. Фазовый сдвиг измеряется в градусах (360° соот-

ветствуют 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

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

Она пульсирует с удвоенной частотой и достигает пиковых значений

$$P = I_M U_M = I_M^2 R = U_M^2 / R$$

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:

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

Выделяемое нагрузкой источников переменного тока тепло пропорционально активной мощности.

1.2.2. Измерение истинного среднеквадратического значения (True RMS)

Переменные напряжения и ток могут характеризоваться различными показателями. Например, переменное периодическое напряжение произвольной формы $u(t)$, помимо амплитудных значений может характеризоваться [5]:

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

$$I_d = I_M / \sqrt{2} \text{ или } U_d = U_M / \sqrt{2}. \quad (1.2)$$

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 средневыпрямленного напряжения (часто его называют просто средним, но это не совсем точно — см. выше). Отклонение формы переменного напряжения от синусоидальной принято учитывать коэффициентом формы:

$$k_\Phi = U_d / U_{CP}.$$

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.

Ныне широкое применение получили персональные компьютеры, сотовые телефоны с импульсным режимом работы передатчиков, импульсные и резонансные преобразователи напряжения и источники питания, электроприводы с регулируемой скоростью и другое оборудование, потребляющее токи в виде кратковременных импульсов или отрезков синусоиды. При этом среднеквадратическое значение сигналов должно учитывать все гармоники его спектра.

К сожалению, при измерениях напряжений и токов с различными, отличными от синусоидальных, временными зависимостями возникают большие проблемы из-за нарушения соотношений между средневыпрямленными 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 измере-

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

ние действующего значения токов порою может дать занижение до 50% истинных результатов.

Не знаящий этого пользователь может долго удивляться, почему предохранитель в устройстве на ток 10 А регулярно сгорает, хотя по показаниям амперметра или обычного мультиметра ток составляет допустимую величину в 10 А. Надо ли говорить о нежелательности подобных грубых измерений в научных исследованиях и при испытании электротехнической аппаратуры?

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.

В наше время современные мультиметры, измеряющие истинное среднеквадратическое значение переменного напряжения или тока (не обязательно синусоидальных), обычно помечаются лейблом «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. Советские милливольтметры с True RMS

Следует отметить, что в СССР уже давно (в 70-х годах прошлого столетия) были созданы массовые приборы, измеряющие истинное среднеквадратическое значение переменного тока. К примеру, это были милливольтметры ВЗ-42/45 (частоты до 5 МГц) и ВЗ-48 (частоты даже до 50 МГц) и др. В милливольтметрах ВЗ-48 был применен целый ряд интересных технических решений:

- входной преобразователь импеданса с полевым транзистором на входе с очень высоким входным сопротивлением и малой емкостью, практически не нагружающий исследуемые цепи;
- широкополосный многозвенный аттенюатор с релейной коммутацией звеньев;
- компенсированный делитель напряжения с коэффициентом деления в 1000 раз, превращающий прибор в вольтметр действующих значений (с пределами от 1 до 300 В);
- широкополосный (от 10 Гц до 50 МГц) линейный транзисторный усилитель входного сигнала с двумя параллельно работающими каналами для уменьшения шумов и линеаризации передаточной характеристики;
- дополнительный широкополосный усилитель, в цепь отрицательной обратной связи которого включены нагреватели термоэлементов, нагрев которых пропорционален истинному среднеквадратичному значению переменного тока;
- балансный термопреобразователь на сдвоенных термopарах, дающий линейную характеристику преобразования среднеквадратического значения сигнала в постоянное напряжение, выход которого предусмотрен на задней панели прибора;

- усилитель постоянного напряжения типа «модуляция-демодуляция», который измерял разность напряжений термопар, выходной ток которого проходит через нагреватели другой пары терморезисторов;
- выход переменного тока с выходным сопротивлением 50 Ом, превращающий прибор в широкополосный усилитель.

Это позволило измерять истинное среднеквадратическое, а не среднее, значения напряжения переменного тока сложной формы с гармоническими составляющими спектра, имеющими частоты вплоть до 50 МГц. Причем измерять вполне естественно — по тепловому действию его и действию равного по нагреву постоянного тока. Естественно, что советские милливольтметры тех времен были стрелочными измерителями, имели значительные габариты и вес (до 6 кг у модели ВЗ-48). Их можно встретить в продаже и сейчас. Достаточно подробное описание милливольтметров ВЗ-45/48 (на уровне функциональной схемы) можно найти в [5].

Интересно сравнить ВЗ-48 с вполне современным стрелочным милливольтметром среднеквадратического значения GVT-417В фирмы Good Will. Последний, при примерно той же погрешности измерений (основная 3%, дополнительная 0,5%) имеет дополнительный предел измерения 0.3 мВ, но полоса частот у него в 50 раз уже (от 10 Гц до 1 МГц). Верхний предел нашего прибора 300 В, у GVT-417В 100 В. Правда прибор меньше по габаритам и легче — вес 2,7 кг. А вот входной импеданс (1 МОм/50 пФ) у молодого юго-восточного собрата куда хуже, чем у советского «старца» (20 МОм и 8 пФ без делителя и 4 пФ с делителем 1/1000). Вот вам и «отсталая» советская техника!

1.2.4. Измерение тока бесконтактными методами

Необходимость контактного подключения измерителей тока в разрыв цепей (особенно под высоким напряжением) является существенным недостатком обычных методов измерения переменного тока. Однако о силе переменного тока можно судить по интенсивности магнитного поля переменного тока, которое образуется, когда через проводник протекает такой ток. На этом основана работа измерителей переменного тока с токовой петлей, реализованной с помощью токовых клещей. Они очень удобны для бесконтактного измерения тока в отдельном проводнике, находящемся в жгуте проводов. Достаточно охватить нужный проводник клещами и замкнуть их.

На основе этого принципа с середины 90-х годов выпускается целый класс ручных измерительных приборов — Clamp meter или в русской транскрипции — токовые клещи. Среди этого класса приборов можно выделить несколько типов, различающихся способом преобразования измеряемого тока.

В ранних моделях использовался захват (разъемные клещи), выполненный из пермоллоевых листов с внутренней измерительной обмоткой. Очевидно, что эта конструкция обычного разъемного трансформатора. Ограничения применения такого прибора хорошо известны.

Работа только в цепях переменного тока и сильная зависимость результатов измерений от частоты. А это, в свою очередь, влияет на диапазон рабочих частот прибора. Данный прибор подробно описан на сайте www.kipis.ru.

В настоящее время почти повсеместно используется полупроводниковый датчик Холла. Такое решение позволяет проводить измерения в цепях постоянного и переменного тока и работать в широком диапазоне частот с хорошими показателями точности измерений.

В последнее время развивается применение конструкции с постоянно открытыми токовыми клещами. Эта конструкция для проведения измерений тока не требует смыкания клещей, что очевидно увеличивает механическую надежность всей конструкции и продлевает жизнь прибору. Но погрешность измерения у таких приборов несколько выше, чем у обычных токовых клещей и обычно достигает до 3—5%.

Применение токовых клещей как конструкции в мультиметрах находится в постоянном развитии и уже вышли токовые клещи, обеспечивающие измерения контура (в т.ч. заземления) бесконтактным методом (например, в модельном ряду «АКТАКОМ» — АТК-4100). Такая конструкция имеет два разъемных магнитопровода и отличается от других своих собратьев по классу токовых клещей тем, что через дополнительную обмотку может производить дополнительное воздействие на объект измерения, что позволяет выполнять измерения контура сопротивления. Очевидно, что частота воздействия отличается от частоты токов сетей промышленного назначения. Появляются мультиметры с тремя токовыми клещами для постоянных бесконтактных измерений в трехфазных сетях.

1.3. Измерители R, C, L и иммитанса

1.3.1. Понятие об индуктивности и емкости

Любой проводник обладает *индуктивностью* L . Она измеряется в Генри (и производных от этой величины, например, $\text{нГн}=10^{-9}$ Гн, $\text{мкГн}=10^{-6}$ Гн и $\text{мГн}=10^{-3}$ Гн) и является параметром, задающим пропорциональность между напряжением на ней и крутизной изменения тока, текущего через индуктивность:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}.$$

Строго говоря, индуктивность — это параметр индуктивных элементов, например, отрезков проводов, петель и колец из них и катушек из изолированного провода (их часто обобщенно именуют катушками индуктивности). К примеру, обычный проводник длиной в 5 см имеет собственную индуктивность порядка 100 нГн. Действие *катушек индуктивности* обусловлено созданием вокруг провода магнитного поля и появлением на индуктивности переменного напряжения при воздействии внешних переменных магнитных полей. Взаимодействие катушек характеризуется *взаимной индуктивностью*.

Катушки индуктивности (или просто индуктивности) выпускаются промышленностью с самой различной конструкцией и различными номиналами L . Они содержат от нескольких витков провода на диэлектрическом сердечнике до сотен и тысяч витков на сердечнике из феррита или стальных пластин. Однако часто разработчики вынуждены изготавливать индуктивные элементы самостоятельно, что делает остро необходимым измерение индуктивности с достаточно малой погрешностью. При оговоренных условиях эксплуатации катушки индуктивности можно считать линейными — за исключением случая размещения их на магнитном сердечнике.

Если подать на идеальную катушку индуктивности неизменное напряжение E то ток через катушку будет линейно нарастать во времени, поскольку в этом случае соблюдается следующее соотношение:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{E}{L} = \text{const.}$$

Это свойство катушки индуктивности иногда используется для построения генераторов развертки для электронно-лучевых трубок (кинескопов) с магнитным отклонением. Однако надо учесть, что если последовательно с L включено сопротивление R , то процесс нарастания тока будет экспоненциальным с постоянной времени L/R . Лишь начальная часть его будет линейной.

Емкость C также является неотъемлемым свойством любой системы проводников. Она измеряется в фарадах (Ф), миллифарадах ($1 \text{ мФ} = 10^{-3} \text{ Ф}$), микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$), нанофарадах ($1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$) и пикофарадах ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

Обычно конденсаторы — устройства для создания заданной емкости используются как готовые промышленные изделия. Для увеличения емкости применяются металлические обкладки достаточной большой площади, разделенные диэлектриком. На этом основано устройство конденсаторов. Физически конденсатор является устройством для накопления заряда ($Q = CU$) и емкость является мерой накопленного заряда при заданном напряжении U на конденсаторе. Для линейной емкости справедливо выражение:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Если проинтегрировать это выражение, то можно получить выражение для напряжения на конденсаторе:

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

Если $i(t) = I = \text{const}$, то напряжение на $C = \text{const}$ возрастает по линейному закону:

$$u(t) = u(0) + \frac{I}{C} t.$$

Это положено в основу создания схем линейной развертки для осциллографов. Если параллельно C включен резистор R , то заряд емкости (конденсатора) будет происходить по экспоненциальному закону с постоянной времени RC . Начальная часть этого процесса (для $t \ll RC$) будет линейной. Это обстоятельство используется при построении простых генераторов развертки электронных осциллографов.

Существует ряд способов измерения емкости. Например, подав на конденсатор прямоугольные импульсы со стабильной амплитудой и частотой, можно измерять средний ток заряда или разряда конденсатора. Он пропорционален емкости C , что дает линейную шкалу измерителей емкости. Этот способ хорош для достаточно больших C — начиная с десятков пФ (емкость измеряется в фарадах и производных от этой величины). Широко практикуется измерение емкости на переменном токе в мостовых и иных измерительных схемах. Для малых емкостей (от долей пФ до тысяч пФ) используются мостовые и резонансные методы измерений.

1.3.2. Эквивалентные и измерительные схемы для индуктивности и емкости

В практике работы любой научной, сервисной или радиолюбительской лаборатории почти ежедневно возникает необходимость в измерении резистивности (сопротивления) R цепей, емкости C и индуктивности L . Так, емкость бумажных и

электролитических конденсаторов сильно меняется во времени и по окончании срока хранения этих компонентов может значительно выйти за пределы приемлемых допусков. Катушки индуктивности часто используются как компоненты собственного изготовления, и их индуктивность нуждается в точном измерении. Часто необходимы точная подгонка L и C (например, для установки частоты резонанса LC -контуров или сборки фильтров), их допускной контроль и измерения температурных зависимостей емкости и индуктивности.

Неидеальность емкости и индуктивности учитывается *эквивалентными схемами*, которые являются одновременно и *измерительными схемами* [55]. Обычно различают две эквивалентные схемы цепей LR и CR (рис. 1.6) — последовательную и параллельную (будем обозначать их индексами s от слова serial и p от слова parallel).

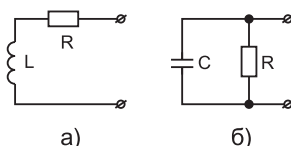


Рис. 1.6. Последовательная (а) и параллельная (б) эквивалентные схемы реальных индуктивностей и емкостей

Омическое сопротивление выводов и обкладок конденсаторов создают паразитное *последовательное сопротивление*, а сопротивление изоляции диэлектрика создает *параллельное сопротивление*. Аналогично сопротивление обмотки катушки индуктивности порождает последовательное сопротивление, а потери в сердечнике порождают параллельное сопротивление. Эти параметры могут преобразовываться, так что достаточно вести измерения по двум указанным схемам (s и p).

На высоких и сверхвысоких частотах, характерных для радиоизмерений, эквивалентные схемы приходится значительно усложнять. Например, для индуктивности надо учесть паразитную емкость монтажа и витков, для емкости — паразитную индуктивность выводов. Нередко они являются *распределенными* величинами. В этом случае определенными преимуществами обладают резонансные методы измерений, реализованные в некоторых радиоизмерительных приборах, например Q -метрах.

Цепи с L и C характеризуются *полным сопротивлением*, называемым также *иммитансом* или *импедансом*. Это понятие имеет смысл только на переменном токе и характеризует комплексное отношение напряжения на измеряемой цепи к току в ней — $Z=U/I$. Полное сопротивление как комплексное число представляется в виде $Z=R_s + j \cdot X$, где R_s — активная составляющая Z , $j \cdot X$ — реактивная составляющая Z , j — мнимая единица (корень квадратный из -1). Часто вводится понятие модуля комплексного сопротивления:

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + X^2}, \text{ причем } R_s = |Z| \cos(\theta) \text{ и } X = |Z| \sin(\theta),$$

где θ — сдвиг фазы между переменным напряжением и током измеряемой цепи. Реактивная составляющая Z для индуктивности и емкости определяется хорошо известными выражениями:

$$X = j \cdot 2\pi fL \text{ для индуктивности и } X = 1/j \cdot 2\pi fC \text{ для емкости.}$$

Поскольку все составляющие Z зависят от частоты, то первостепенным параметром измерений является тестовая частота f . В принципе желательно испыты-

вать конденсаторы и катушки индуктивности на их рабочей частоте, например, на частоте резонанса колебательных LCR -контуров. Однако на практике, приходится ограничиваться несколькими частотами, а то и одной частотой.

Важное значение играют еще два параметра цепей на переменном токе — *тангенс угла потерь* δ — D и обратная ему величина — *добротность*. Для последовательной схемы измерений они определяются выражениями:

$$Q_L = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{2\pi fL}{R_s} \text{ и } Q_C = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{1}{2\pi fC_s R_s}.$$

Аналогично для параллельной схемы измерений имеем:

$$Q_L = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = \frac{R_p}{2\pi fL} \text{ и } Q_C = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{|X_p|}{R_p} = 2\pi fC_p R_p.$$

Параметр D обычно используется для оценки неидеальности емкостей, а Q — катушек индуктивности. Однако, в принципе, оба параметра применимы как к емкостям, так и индуктивностям.

Измерение сопротивления и емкости на низкой частоте (сопротивления на постоянном токе — DCR) в настоящее время реализуется в большинстве многофункциональных портативных измерительных приборов — *мультиметров*. Однако диапазон измерений и точность измерения этих параметров у большинства мультиметров ограничены, а измерение индуктивности предусмотрено вообще лишь у очень малой части этих приборов. Это связано с необходимостью введения в них прецизионного генератора тестовой частоты. Кроме того, у обычных мультиметров отсутствует возможность измерения таких важных параметров, как последовательного и параллельного сопротивлений на переменном токе, добротности и тангенса угла потерь.

Все это привело к разработке специализированных мультиметров и RLC -измерителей. Современные настольные лабораторные приборы этого типа (например, LCR-816, LCR-817, LCR-827, LCR-819 и LCR-829) обеспечивают высочайшую точность (погрешность до 0,2% и менее) измерений импеданса в диапазоне частот до 100 кГц. Однако это дорогие приборы. В то же время многие современные RLC -измерители выполнены в виде малогабаритных переносных приборов по конструкции и внешнему виду похожи на мультиметры (в сущности, они и являются мультиметрами, но только специализированными). Эти приборы имеют умеренную стоимость и удобны в эксплуатации. Именно они, в основном, и рассматриваются ниже.

1.3.3. Портативные измерители индуктивности и емкости

К числу простейших и дешевых (цена около 60\$) RCL -измерителей относится миниатюрный прибор LCR-9063. Он имеет пределы измерения емкости от 1 пФ до 200 мкФ, индуктивности от 1 мкГн до 20 Гн и сопротивления от 0,1 Ом до 20 МОм. Измерения производятся на одной частоте 250 Гц, погрешность измерений 2%. ЖКИ имеет 3 1/2 разряда. Питание прибор получает от батареи 9 В, габариты прибора 120×72×37 мм, масса всего 185 г.

Таковыми же пределами измерения характеризуется прибор LCR-9073 (рис. 1.7). Однако он дополнен возможностями измерения добротности от 0,0001 до 9999, тангенса угла потерь от 0,0001 до 9999, прозвоном диодов и цепей. Есть также возможность удержание показаний, фиксация максимальных и минимальных зна-

Содержание

Предисловие.....	3
Глава 1. Основы электронных измерений и мультиметры	5
1.1. Измерения на постоянном токе.....	5
1.1.1. Источники напряжения и тока	5
1.1.2. Резисторы и резистивность	8
1.1.3. Измерения в произвольных цепях постоянного тока	8
1.2. Измерения переменного напряжения и тока	9
1.2.1. Параметры синусоидального напряжения и тока	9
1.2.2. Измерение истинного среднеквадратического значения (True RMS)	10
1.2.3. Советские милливольтметры с True RMS	12
1.2.4. Измерение тока бесконтактными методами	13
1.3. Измерители R, C, L и иммитанса.....	14
1.3.1. Понятие об индуктивности и емкости	14
1.3.2. Эквивалентные и измерительные схемы для индуктивности и емкости ...	15
1.3.3. Портативные измерители индуктивности и емкости	17
1.3.4. Измерители иммитанса (импеданса)	19
1.3.5. Измеритель иммитанса E7-22 и работа с ним	20
1.3.6. Стационарные лабораторные LCR-измерители компании Good Will	23
1.3.7. Специфика измерений L, C и R	25
1.4. Портативные аналоговые и цифровые мультиметры.....	27
1.4.1. Рынок мультиметров и тенденции их развития.....	27
1.4.2. Функциональная схема цифрового мультиметра.....	29
1.4.3. Обзор массовых моделей мультиметров	30
1.4.4. Мультиметры для промышленных применений.....	32
1.4.5. Мультиметры с токовыми клещами.....	34
1.4.6. Мультиметры — токовые клещи для измерения мощности в трехфазных сетях.....	36
1.4.7. Мультиметры с цифровыми и аналоговыми измерителями.....	38
1.4.8. Мультиметры-щупы	39
1.4.9. Цифровые мультиметры с интерфейсом RS-232	39
1.4.10. Многоцелевой мультиметр METEX M-6000D	44
1.4.11. Цифровые мультиметры M-3890D и M-3890DT фирмы METEX с интерфейсом USB	45
1.4.12. Работа USB-мультиметров с персональным компьютером	48
1.5. Цифровые частотомеры	50
1.5.1. Принципы построения цифровых частотомеров.....	50
1.5.2. Цифровые частотомеры АКТАКОМ серии АСН	50
1.6. Элементная база современных мультиметров.....	52
1.6.1. Микросхемы АЦП с цифровыми индикаторами.....	52
1.6.2. Микросхемы преобразователей True RMS в постоянное напряжение.....	53
1.6.3. Примеры применения микросхем MX536A/536	55
1.6.4. Пример построения вольтметра на основе микросхем MX536A/536	56
1.6.5. Микросхема AD693 усилитель сигнала температурного датчика.....	57

1.6.6. Микросхемы интерфейсов RS-232.....	57
Глава 2. Источники напряжений, токов и тестовых сигналов	59
2.1. Источники постоянных напряжений и токов.....	59
2.1.1. Кремниевые стабилитроны как источники опорного напряжения	59
2.1.2. Микросхемы источников опорного напряжения	61
2.1.3. Микросхемы последовательных стабилизаторов	64
2.1.4. Микросхемы параллельных стабилизаторов	66
2.1.5. Супервизоры питания	66
2.1.6. Микросхемы импульсных преобразователей DC-DC	67
2.1.7. Микросхемы импульсных преобразователей AC-DC.....	69
2.1.8. Источники постоянного тока.....	70
2.1.9. Лабораторные источники постоянного напряжения и тока.....	71
2.2. Источники синусоидальных сигналов.....	73
2.2.1. Типы источников синусоидального напряжения	73
2.2.2. Пример схемы RC-генератора.....	75
2.2.3. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общей базой	76
2.2.4. LC-генератор на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором.....	77
2.2.5. LC-генераторы с упрощенным включением контура.....	77
2.2.6. Генераторы на пьезокерамических фильтрах.....	78
2.2.7. Кварцевые резонаторы	79
2.2.8. Кварцевые генераторы на логических микросхемах	81
2.2.9. Кварцевый генератор на операционном усилителе.....	82
2.2.10. Кварцевый генератор на биполярном транзисторе	82
2.2.11. Промышленные модули кварцевых генераторов	83
2.2.12. Промышленные генераторы низкочастотных сигналов.....	83
2.2.13. Генераторы стандартных сигналов (ГСС) высоких частот	85
2.3. Функциональные генераторы	87
2.3.1. Принципы построения функциональных генераторов	87
2.3.2. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного	88
2.3.3. Микросхема функционального генератора MAX	89
2.3.4. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы Wavetek Meterman ..	93
2.3.5. Функциональные генераторы и частотомеры фирмы METEX	94
2.3.6. Программа стыковки приборов METEX с компьютером.....	97
2.3.7. Функциональный генератор 33220A фирмы Agilent.....	98
2.4. Генераторы качающейся частоты (ГКЧ) и измерители АЧХ	99
2.4.1. Промышленные ГКЧ и измерители АЧХ	99
2.4.2. Применение функциональных генераторов в качестве ГКЧ.....	101
2.4.3. Построение ГКЧ на высоких частотах	102
2.4.4. Работа с измерителем АЧХ X1-50	103
2.5. Измерительные комплексы MS-9150/60/70 фирмы METEX	107
2.5.1. Приборный состав комплекса	107
2.5.2. Универсальный мультиметр комплексов.....	107
2.5.3. Функциональный генератор и частотомер комплексов	107
2.5.4. Встроенный лабораторный источник питания	108
2.6. Широкополосные и импульсные интегральные усилители и компараторы..	108
2.6.1. О требованиях к интегральным усилителям	108

2.6.2. Широкополосные интегральные усилители фирмы BURR-BROWN.....	109
2.6.3. Интегральный аналог идеального биполярного транзистора	112
2.6.4. Сверхширокополосные дифференциальные усилители фирмы MAXIM.....	114
2.6.5. Сверхширокополосные одноходовые усилители фирмы MAXIM.....	115
2.6.6. Сверхскоростные интегральные компараторы.....	119
2.7. Источники импульсных сигналов.....	120
2.7.1. Промышленные генераторы импульсов	120
2.7.2. Импульсные генераторы на транзисторах и интегральных микросхемах	123
2.7.3. Импульсные генераторы на интегральном таймере	124
2.7.4. Импульсные устройства на негатронах.....	126
2.8. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов	133
2.8.1. Генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000	133
2.8.2. Возможности генераторов серии AFG3000	136
2.8.3. Работа генераторов серии AFG3000 с компьютером.....	141
2.8.4. Генераторы произвольных сигналов других фирм	143
Глава 3. Основы электронной осциллографии	146
3.1. Сигналы и их спектры.....	146
3.1.1. Синусоидальные колебания и сигналы	146
3.1.2. Понятие о спектральном синтезе сложных сигналов.....	147
3.1.3. Фурье-анализ и синтез периодических функций	148
3.1.4. Дискретный Фурье-анализ и спектр периодических функций	150
3.1.5. Непрерывное преобразование Фурье для произвольного сигнала.....	150
3.1.6. Быстрое преобразование Фурье (БПФ).....	152
3.1.7. Эффект Гиббса.....	152
3.1.8. Спектральный анализ дискретных сигналов.....	154
3.2. Начало осциллографии	155
3.2.1. Рождение электронной осциллографии.....	155
3.2.2. Осциллограф и трубка Брауна.....	155
3.2.3. Осциллографическая трубка с электростатическим отклонением	157
3.3. Современные осциллографические трубки	160
3.3.1. Особенности конструкции осциллографических ЭЛТ	160
3.3.2. Графическая скорость луча	161
3.3.3. Время установления отклоняющей системы.....	161
3.3.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ	163
3.3.5. Осциллографические трубки специального назначения.....	165
3.4. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа.....	167
3.4.1. Принцип действия осциллографа	167
3.4.2. Структурная схема аналогового осциллографа	168
3.4.3. Требования к усилителям осциллографа	171
3.4.4. Особенности широкополосных осциллографических усилителей	177
3.4.5. Принципы построения генераторов развертки	182
3.4.6. Узлы синхронизации осциллографов.....	185
3.4.7. Блоки питания осциллографов.....	185
3.5. Принцип действия и устройство цифрового запоминающего осциллографа	186
3.5.1. Блок-схема цифрового запоминающего осциллографа.....	186
3.5.2. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов.....	187

3.5.3. Получение спектрограмм сигнала цифровыми осциллографами.....	189
3.6. Параметры и выбор электронных осциллографов.....	192
3.6.1. Основные параметры.....	192
3.6.2. Дополнительные параметры	193
3.6.3. Выбор осциллографов	193
Глава 4. Аналоговые электронные осциллографы.....	203
4.1. Осциллографы первого и второго поколений.....	203
4.1.1. Первое поколение ламповых осциллографов.....	203
4.1.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов	203
4.1.3. Осциллографы для радиолюбителей	205
4.2. Современные сервисные аналоговые осциллографы	206
4.2.1. Сервисные осциллографы серий ОСУ и МРС.....	206
4.2.2. Отечественные сервисные осциллографы	208
4.3. Современные отечественные универсальные осциллографы	210
4.3.1. Отечественные универсальные осциллографы.....	210
4.3.2. Современные универсальные осциллографы фирмы Good Will	217
4.3.3. Современные универсальные осциллографы серии АСК.....	220
4.3.4. Осциллографы АКТАКОМ-IWATSU Hi-End класса	226
4.3.5. Универсальные осциллографы фирмы HITACHI.....	229
4.3.6. Осциллографы фирмы PINTEK.....	230
4.3.7. Аналоговые осциллографы фирмы EZ Digital	232
Глава 5. Стационарные цифровые и стробоскопические осциллографы	237
5.1. Цифровое представление аналоговой информации	237
5.1.1. Общие принципы построения цифровых осциллографов	237
5.1.2. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов	240
5.1.3. Об интерполяции в цифровых осциллографах	241
5.2. Современные аналого-цифровые осциллографы.....	242
5.2.1. Аналого-цифровые осциллографы АКТАКОМ	242
5.2.2. Аналого-цифровые осциллографы фирмы Good Will	243
5.2.3. Аналого-цифровой осциллограф С1-137/2.....	244
5.3. Цифровые осциллографы.....	245
5.3.1. Цифровые осциллографы Минского приборостроительного завода	245
5.3.2. Цифровые осциллографы фирмы Good Will.....	249
5.3.3. Цифровые осциллографы АКТАКОМ	250
5.3.4. Цифровые осциллографы фирмы HITACHI.....	253
5.3.5. Цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX.....	254
5.3.6. Цифровые осциллографы фирмы LeGroy (общая оценка).....	260
5.3.7. Цифровые осциллографы LeGroy WaveRunner.....	262
5.3.8. Цифровые осциллографы LeGroy WaveSurfer.....	266
5.3.9. Цифровые осциллографы LeGroy WavePro.....	266
5.3.10. Цифровые осциллографы LeGroy WaveMaster.....	270
5.3.11. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц	271
5.3.12. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies.....	274
5.4. «Бюджетные» цифровые запоминающие осциллографы	276
5.4.1. Какие из цифровых осциллографов можно отнести к бюджетным.....	276

5.4.2. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX	276
5.4.3. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы Agilent	277
5.4.4. «Бюджетные» цифровые осциллографы фирмы EZ Digital	277
5.4.5. «Бюджетные» осциллографы фирмы WENS	284
5.4.6. Цифровые осциллографы фирмы RIGOL	284
5.4.7. Цифровые осциллографы серии WaveJet фирмы LeGroy	286
5.5. Особенности осциллографов класса Hi-End	286
5.5.1. Сравнение осциллографов класса Hi-End различных фирм	286
5.5.2. Режимы выборки и пик-детектор	287
5.5.3. Получение глазковых диаграмм	288
5.5.4. Осциллографы фирмы Tektronix с Цифровым Люминофором.....	289
Глава 6. Портативные цифровые осциллографы	293
6.1. Тенденция микроминиатюризации цифровых осциллографов.....	293
6.2. Миниатюрные осциллографы объединения АКТАКОМ	293
6.2.1. Портативные осциллографы серии АСК.....	293
6.2.2. Осциллограф-щуп АСК-4011	294
6.3. Портативные осциллографы фирмы Fluke	295
6.3.1. Цифровые осциллографы — скопметры.....	295
6.3.2. Скопметры Fluke 105B/99B/96B/92B	295
6.3.3. Скопметры Fluke серии 120	297
6.3.4. Осциллографы и скопметры Fluke серии В	299
6.3.5. Скопметры серии 190	302
6.4. Мультиметры-осциллографы фирм ВЕЕТЕСН и WENS.....	304
6.4.1. Мультиметры-осциллографы фирмы ВЕЕТЕСН.....	304
6.4.2. Мультиметры-осциллографы WENS 820	306
6.5. Портативные осциллографы фирмы Velleman	306
6.5.1. Портативный осциллограф HPS5.....	306
6.5.2. Портативный персональный осциллограф HPS10.....	307
6.5.3. Портативный осциллограф HPS40	308
6.5.4. Панельный осциллограф VPS10	308
6.5.5. Малогабаритный цифровой осциллограф APS 320	308
6.6. Портативный осциллограф-мультиметр DMM-740.....	309
6.7. Портативные осциллографы/мультиметры фирмы METEX.....	310
6.7.1. Одноканальный осциллограф/мультиметр MS-1280	310
6.7.2. Осциллограф/мультиметр MS-2000.....	311
6.7.3. Осциллограф-мультиметр DG SCOPE.....	312
6.8. Портативные осциллографы корпорации Tektronix	313
6.8.1. Серия осциллографов Tektronix THS700	313
6.8.2. Серия осциллографов Tektronix TPS2012/2014/2024	314
6.8.3. Портативные осциллографы Tektronix TPS2012/2014/2024 с Цифровым люминофором	315
6.9. Цифровые осциллографы — ноутбуки фирмы Hitachi	317
Глава 7. Виртуальные РС-осциллографы и лаборатории	319
7.1. Виртуальные РС-осциллографы	319
7.1.1. Назначение виртуальных осциллографов и их типы.....	319

7.1.2. Виртуальные осциллографы в виде плат расширения ПК	320
7.2. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman.....	321
7.2.1. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman.....	321
7.2.2. Анализатор спектра виртуального осциллографа фирмы Velleman	323
7.2.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman.....	323
7.2.4 Работа с PC-осциллографом фирмы Velleman.....	324
7.3. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	327
7.3.1. Функциональные измерительные генераторы	327
7.3.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	327
7.3.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman	329
7.4 Компьютеризированная лаборатория PC-Lab 2000	330
7.4.1. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000.....	330
7.4.2. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000	331
7.5. Новые возможности виртуальной лаборатория PC-Lab 2000 v. 1.38	334
7.5.1. Развитие лаборатории PC-Lab 2000	334
7.5.2. Установка обновленной лаборатории PC-Lab 2000.....	334
7.5.3. Новый режим запоминания (персистенции) осциллограмм PERSIST.....	335
7.5.4. Отключение режима соединения точек графиков.....	336
7.5.5. Автоматизация измерений параметров осциллограмм.....	336
7.5.6. Режим запоминания спектрограмм.....	339
7.5.7. Другие возможности обновленной PC-Lab 2000	339
7.5.8. Виртуальный самописец PCS10 (K8047)	341
7.5.9. Виртуальный USB-осциллограф PCSU1000.....	343
7.5.10. Виртуальная лаборатория PC-Lab 2000SE	343
7.6. Осциллографические модули и платы фирмы BORDO.....	347
7.6.1. Цифровой осциллограф BORDO-421 с USB-интерфейсом.....	347
7.6.2. Цифровые осциллографы — плата B-121 и приставка B-323.....	348
7.6.3. Двухканальные цифровые осциллографы — платы PCI.....	351
7.6.4. Интерфейс пользователя осциллографов фирмы BORDO	353
7.7. Платы-осциллографы других фирм	353
7.7.1. Ультраскоростные платы M8-500, M8-500Y и M8-1000.....	353
7.7.2. Приставка-осциллограф DSO-2100.....	355
7.7.3. Осциллографическая приставка SDS200	356
7.8. Виртуальная USB-лаборатория АКТАКОМ.....	358
7.8.1. Управляемые источники питания АТН-1535/1539	358
7.8.2. Функциональные генераторы АНП-3121/3122	358
7.8.3. Генератор измерительных телевизионных сигналов АНП-3125/3126	359
7.8.4. Цифровые запоминающие осциллографы АСК-3106/3107/3116/3117.....	360
7.8.5. Комбинированный прибор АСК-4106.....	362
7.9. Виртуальный характериограф АСС-4211.....	366
7.9.1. Приставка АСС-4211 и ее параметры.....	366
7.9.2. Работа с приставкой АСС-4211	366
7.10. Скоростные платы компании GaGe	367
7.10.1. Обзор продукции компании GaGe.....	367
7.10.2. Программное обеспечение виртуальных осциллографов GaGe	370
Глава 8. Осциллографические измерения	373

8.1. Подготовка аналогового осциллографа к работе	373
8.1.1. Включение аналогового осциллографа и подготовка его к работе	373
8.1.2. Подключение осциллографа к источнику сигнала	374
8.1.3. Выбор режимов работы усилителей канала Y	375
8.1.4. Калибровка чувствительности	376
8.1.5. Учет влияния входной цепи осциллографа	377
8.1.6. Применение компенсированных делителей напряжения	378
8.1.7. Установка точной компенсации делителя	380
8.1.8. Лабораторные испытания аналоговых осциллографов	382
8.2. Работа с разверткой и синхронизация	384
8.2.1. Изменение режимов развертки	384
8.2.2. Запуск нарастающим или спадающим изменением сигнала	385
8.2.3. Установка длительности и растяжка развертки	385
8.2.4. Наблюдение телевизионных сигналов	386
8.2.5. Выбор источника запуска и синхронизации развертки	386
8.3. Измерение параметров сигналов	387
8.3.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала	387
8.3.2. Измерение временных интервалов	388
8.3.3. Измерение сдвига фаз синусоидальных сигналов	389
8.4. Измерения в режиме X-Y	389
8.4.1. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу	389
8.4.2. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу	391
8.4.3. Осциллограф в роли характериографа	391
8.5. Некоторые другие применения осциллографа	393
8.5.1. Наблюдение амплитудно-модулированных сигналов	393
8.5.2. Вычисление коэффициента модуляции	395
8.5.3. Применение калибратора для исследования переходных процессов в RC-цепях	395
8.5.4. Наблюдение переходных процессов в LRC-цепях	396
8.5.5. Курсорные измерения	397
8.6. Особенности измерений цифровыми осциллографами	398
8.6.1. Измерение постоянных напряжений и калибровка	398
8.6.2. Измерение частотных и временных параметров цифровых осциллографов	399
8.6.3. Выбор вида интерполяции	401
8.6.4. Использование накопления (аналогового послесвечения)	402
8.6.5. Работа с памятью цифрового осциллографа	402
8.6.6. Цифровой осциллограф в роли анализатора спектра	403
8.7. Специальные вопросы осциллографирования	404
8.7.1. О дискуссии «Good Will против Tektronix»	404
8.7.2. Как регистрируют процессы различные типы осциллографов	405
8.7.3. О роли памяти в цифровых осциллографах	406
8.7.4. Применение окна для просмотра части содержимого памяти	406
8.7.5. О случайной дискретизации и эффективной ее частоте	408
8.7.6. Курсорные и автоматические вычисления	410
8.7.7. Особенности работы разверток и синхронизации	411

8.7.8. Быстрое преобразование Фурье и другие возможности осциллографов Good Will	413
8.7.9. Применение осциллографов с Цифровым Люминофором.....	414
8.8. Работа с массовыми цифровыми осциллографами серии DS-1000	417
8.8.1. Начало работы с осциллографами серии DS-1000	417
8.8.2. Применение режима усреднения осциллограмм	418
8.8.3. Режим наложения осциллограмм (персистенции).....	419
8.8.4. Особенности наблюдения сигналов	420
8.8.5. Работа с разверткой и системой запуска	421
8.8.6. Работа с основной группой кнопок меню.....	422
8.8.7. Применение режима XY	422
8.8.8. Работа с курсорами и курсорные измерения	423
8.8.9. Автоматические измерения	423
8.8.10. Применение пикового детектора.....	424
8.8.11. Просмотр деталей осциллограмм	424
8.8.12. Сохранение осциллограмм и установок осциллографа	426
8.8.13. Допусковый контроль осциллограмм.....	426
8.8.14. Быстрое преобразование Фурье и получение спектрограмм	426
8.8.15. Подключение осциллографов к принтеру	428
8.8.16. Подключение осциллографа к компьютеру.....	428
8.8.17. Применение сервисных утилит	430
8.9. Особенности работы осциллографов с различными сигналами	431
8.9.1. Подключение осциллографа к источникам сигналов	431
8.9.2. Просмотр сигналов с цифровых устройств	433
8.9.3. Измерение крутизны и нелинейности пилообразных сигналов.....	434
8.9.4. Осциллографирование телевизионных сигналов	435
Глава 9. Практическая работа с компьютеризированными лабораториями.....	437
9.1. Интерфейс компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000	437
9.1.1. Общий вид окна лаборатории PC-Lab 2000	437
9.1.2. Добавление текста в окно экрана.....	439
9.1.3. Меню лаборатории PC-Lab 2000	440
9.1.4. Позиция Options меню	440
9.1.5. Опции позиции View	442
9.1.6. Позиция Math задания математических операций.....	442
9.1.7. Меню файловых операций File	445
9.1.8. Работа со справкой PC-Lab 2000.....	446
9.2. Осциллографирование в PC-Lab 2000 в реальных условиях	446
9.2.1. Просмотр синусоидальных колебаний высоких частот	446
9.2.2. Просмотр амплитудно-модулированного сигнала	450
9.2.3. Функциональная схема исследование электронных цепей и устройств.....	451
9.2.4. Исследование дифференцирующей RC-цепочки	452
9.2.5. Получение семейств осциллограмм в режиме PERSIST	454
9.2.6. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на меандр.....	454
9.2.7. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на сложные импульсы.....	456
9.2.8. Исследование реакции LRC-цепочки на меандр	456
9.2.9. Исследование релаксационного генератора	456

9.3. Анализ спектра реальных сигналов.....	461
9.3.1. Назначение анализаторов спектра	461
9.3.2. Спектр синусоидального сигнала	461
9.3.3. Работа с окнами и режимами усреднения	462
9.3.4. Спектр амплитудно-модулированного колебания	463
9.3.5. Спектр прямоугольных и треугольных импульсов	467
9.3.6. Спектр сигнала вида $\sin(t)/t$	467
9.4. Работа с построителем АЧХ и ФЧХ устройств.....	469
9.4.1. Назначение и роль построителя АЧХ и ФЧХ.....	469
9.4.2. Построение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC-цепи.....	469
9.4.3. Построение АЧХ и ФЧХ колебательного LRC-контура	470
9.5. Работа PC-Lab 2000 с системой Mathcad	471
9.5.1. Передача осциллограмм в среду системы Mathcad.....	471
9.5.2. Взаимодействие Mathcad с функциональным генератором.....	472
9.5.3. Импорт спектрограмм	473
9.5.4. Об экспорте данных из Mathcad	474
9.6. Работа PC-Lab с системой MATLAB	475
9.6.1. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB.....	475
9.6.2. Взаимодействие MATLAB с виртуальным функциональным генератором	475
9.6.3. Импорт спектрограмм в MATLAB	476
9.6.4. Об экспорте данных из MATLAB	477
9.7. Работа с виртуальными лабораториями АКТАКОМ	478
9.7.1. Подготовка виртуальных лабораторий.....	478
9.7.2. Работа с осциллографом-анализатором.....	478
9.7.3. Применение анализатора спектра	481
9.7.4. Осуществление цифровой фильтрации.....	482
9.7.5. Математическая обработка сигналов	483
9.7.6. Статистические вычисления	484
9.7.7. Эмуляция сигналов.....	485
9.7.8. Работа в качестве виртуального самописца.....	485
9.7.9. Задание аварийной сигнализации	486
9.7.10. Работа с разверткой и памятью	487
9.7.11. Работа с курсорами	488
9.7.12. Режим мультиналожения.....	489
9.7.13. Измерение фазового сдвига	489
9.7.14. Применение режима цифрового вольтметра.....	490
9.7.15. Построение гистограммы распределения вероятности	490
9.7.16. Сохранение данных	491
9.7.17. Работа с модулем функционального генератора	492
9.7.18. Системные функции.....	496
9.8. Работа АСК-4106 с реальными сигналами	497
9.8.1. Измерительная схема и развертывание лаборатории	497
9.8.2. Автоматические измерения и определяемые параметры сигналов	498
9.8.3. Предоставление результатов измерений	499
9.8.4. Настройка графиков	501
9.8.5. Просмотр табличных данных.....	502
9.8.6. Применение модуля анализа формы сигналов	503

9.9. 18-ГГц осциллографический комплекс на базе стробоскопа С1-91/4 и приставки АСК-3106/4106.....	504
Глава 10. Пайка и паяльное оборудование	511
10.1. Обычная пайка	511
10.1.1. Общие сведения о пайке	511
10.1.2. Электрические паяльники и паяльные ванны	511
10.1.3. Припой и флюсы	515
10.1.4. Газовые паяльники	515
10.2. Паяльные станции	516
10.2.1. Простая паяльная станция SR 976ESD фирмы Solomon	516
10.2.2. Улучшенные паяльные станции с электрическим паяльником.....	517
10.2.3. Паяльные станции для пайки горячим воздухом	518
10.3. Организация рабочего места для пайки.....	520
10.3.1. Меры против статического электричества.....	520
10.3.2. Выбор инструментов для пайки	521
10.3.3. Процесс пайки	521
10.3.4. Распайка компонентов	523
Литература.....	525