

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет

В.П. КРЫЛОВ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ
АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Лабораторный практикум

Владимир 2003

УДК 621.396.6 (075.8)

К85

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор зав. кафедрой
"Электротехника и микропроцессорная электроника" Московского
государственного института стали и сплавов (технического
университета)

Ф.И. Маняхин

Доктор технических наук, профессор кафедры электрофизики
Московского энергетического института (технического
университета)

С.К. Шмелев

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Крылов В.П.

К85 Автоматизированный контроль аналоговых интегральных
микросхем: Лабораторный практикум / Владим. гос. ун-т.
Владимир, 2003. 68 с.
ISBN 5-89368-376-5

Лабораторный практикум содержит описания лабораторных работ по курсу "Технология производства радиоэлектронных средств", выполняемых на базе автоматизированного тестера TR-9574 фирмы EMG (Венгрия).

Рассчитан на студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 551100, 654300 и специальностям 200800 – проектирование и технология радиоэлектронных средств и 220500 – проектирование и технология электронно-вычислительных средств.

Табл. 17. Ил. 9. Библиогр.: 20 назв.

УДК 621.396.6 (075.8)

ISBN 5-89368-376-5

©Владимирский государственный
университет, 2003

©Крылов В.П., 2003

Оглавление

Введение	4
Раздел 1. ВИДЫ, МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	5
Раздел 2. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕСТЕР TR-9574	13
2.1. Общие сведения	13
2.2. Состав и диапазоны контролируемых параметров	16
2.3. Сопряжение с внешними устройствами	25
2.4. Особенности эксплуатации и диагностика ошибок	27
Раздел 3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ	29
3.1. Общие рекомендации	30
3.2. Статистические "портреты" поставщика ИМС	36
3.3. Статистическая разрешающая способность контроля	45
Раздел 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ	49
4.1. Измерения и контроль параметров ИМС	49
4.2. Программирование тестера TR-9574	50
4.3. Исследование влияния условий измерений	54
4.4. Разработка адаптера для контроля аналоговой ИМС	56
4.5. Согласование требований российских и зарубежных нормативных документов по контролю ИМС	59
4.6. Изучение "портрета" поставщика ИМС	60
4.7. Определение разрешающей способности контроля	62
4.8. Оформление отчетов	63
Контрольные вопросы	64
Заключение	66
Библиографический список	67

Введение

Автоматизированный контроль аналоговых интегральных микросхем (ИМС) обычно сводится к параметрическому контролю [10]. Особенности его обусловлены тем, что аналоговые микросхемы, в отличие от цифровых, предназначены для обработки аналоговых сигналов, несущих прямое отображение информации в реальном масштабе времени. Операции, выполняемые аналоговыми устройствами (стабилизация или усиление по току или напряжению, сравнение напряжений, модуляция, детектирование и т. п.), характеризуются соответствием определенных уровней выходных сигналов различным уровням входных сигналов. Информативным (интерфейсным) может быть любой параметр импульсно-потенциального или синусоидального сигнала (напряжение, ток, мощность, время, частота и т. д.).

Предлагаемый вашему вниманию лабораторный практикум на базе универсального автоматизированного тестера TR-9574 венгерской фирмы EMG (разд. 2) поможет приобрести практические навыки решения некоторых из рассмотренных в разд. 1 и 3 проблем контроля аналоговых интегральных микросхем.

Лабораторные задания (разд. 4) рассчитаны главным образом на студентов старших курсов направления 551100 "Проектирование и технология электронных средств", знакомых с основами аналоговой схемотехники в объеме курсов "Основы радиоэлектроники" и "Аналоговая и цифровая микросхемотехника". Вместе с тем автор считает, что выполнение лабораторного задания 4.1 (см. разд. 4) полезно студентам младших курсов при изучении перечисленных дисциплин.

Данное пособие является составной частью методического обеспечения технологического цикла дисциплин указанного направления. Не затронутым в нем вопросам технологии автоматизированного контроля аналоговых интегральных микросхем в той или иной степени посвящены методические разработки кафедр КТ РЭС [10, 17] и РТ и РС [13] ВлГУ. В подразд. 2.3, 3.2, 4.5 использованы результаты научных разработок автора и его коллег.

Раздел 1.

ВИДЫ, МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Аналоговыми называются интегральные микросхемы [4], предназначенные для обработки сигналов, имеющих вид непрерывных функций времени. Частным случаем являются линейные микросхемы — аналоговые ИМС с линейными характеристиками. Необходимость контроля [3] возникает как при изготовлении самих интегральных микросхем на предприятиях электронной промышленности, так и в процессе изготовления электронных средств (ЭС) с использованием ИМС на сборочных предприятиях. Виды контроля различают в зависимости от его места в технологических процессах изготовления ИМС (операционный, выходной) или сборки ЭС (входной), а также в зависимости от степени охвата контролем продукции (сплошной, выборочный).

Для инженеров специальностей 200800 и 220500 наибольший интерес представляют особенности организации входного контроля ИМС. Входной контроль осуществляют по параметрам (требованиям) и методам, установленным в нормативно-технической документации (НТД) на контролируемую продукцию, договорах на ее поставку и протоколах разрешения.

Решение о введении входного контроля ИМС, увеличении или сокращении его объемов в сторону выборочного контроля вплоть до полной отмены потребитель обычно принимает на основе результатов сплошного входного контроля или результатов эксплуатации ЭС на ИМС. Обычно этому решению предшествует выбор схемы взаимодействия с изготовителем ИМС.

Взаимодействие может быть непосредственным (японский вариант) или через посредника. Посредник, в свою очередь, может быть либо простым перекупщиком (вариант, характерный для постперестроенной России), либо иметь свои средства контроля и испытаний

ИМС (американо-европейский вариант). В этом случае, согласно, например, законодательству США, ответственность изготовителя ИМС за качество своей продукции полностью переходит на посредника.

По российским законам изготовитель ИМС пока несет ответственность за свою продукцию вплоть до окончания периода гарантийной эксплуатации независимо от длины цепочки посредников. Однако следует иметь в виду, что это относится к так называемой кондиционной продукции, которая признана годной средствами выходного контроля (ОТК) изготовителя и после изготовления вплоть до продажи конечному потребителю через цепочку посредников не подвергается недопустимым внешним воздействиям, что должно быть подтверждено документально. В то же время в России действует также закон о защите прав потребителей, возлагающий определенную долю ответственности на продавца элементной базы.

Необходимость и объем входного контроля диктуется в основном экономическими соображениями [19]. Так, если принять стоимость входного контроля одной ИМС за единицу, то стоимость замены неисправной ИМС в печатной плате возрастает в 5 – 10 раз, в аппаратуре при ее испытании в 100 раз и в аппаратуре, эксплуатируемой потребителем, более чем в 1000 раз. Другой известный пример¹ — влияние засоренности партий изделий электронной техники (ИЭТ) на выход ячеек (печатных плат с ними). Наличие 0,01 % дефектных ИЭТ снижает выход годных печатных плат, содержащих 100 ИЭТ, до 99 %. 2 % дефектных ИЭТ уменьшают выход до 13,3 %, а 5 % дефектных ИЭТ делают все 100 % ячеек негодными. В этой работе также отмечается, что каждый доллар, затраченный на исключение брака при входном контроле, дает увеличение прибыли до 4,5 доллара.

Кроме того, входной контроль (особенно в условиях японского варианта) позволяет значительно повысить оперативность связи между изготовителем ИМС и потребителем, так как он является первым источником информации о качестве и надежности ИМС в сфере эксплуатации.

¹Горлов М.И., Грищенко В.Т. Входной контроль изделий электронной техники / АООТ "Видеофон". – Воронеж, 1993. – 71 с.

Будучи первым барьером, позволяющим не допускать для дальнейшего использования ИМС, не соответствующие техническим требованиям, входной контроль может явиться и источником скрытых повреждений ИМС. Поэтому главное и первостепенное требование к входному контролю — это обеспечение безопасного прохождения через него ИМС, что достигается путем тщательной отработки методик входного контроля, основанных главным образом на неразрушающих методах проверки электрических параметров ИМС.

С увеличением объемов контроля ИМС возникает необходимость его автоматизации за счет использования универсальных автоматизированных тестеров или создания собственных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), удовлетворяющих требованиям действующих нормативно-технических документов. Автоматизация также способствует росту уровня объективности (качества) контроля, исключая субъективные ошибки контролера.

Перечислим основные задачи входного контроля продукции по ГОСТ 24297–87 [7]:

- проверка наличия сопроводительной документации на продукцию, удостоверяющей качество и комплектность продукции;
- контроль соответствия качества (включая контроль электрических параметров) и комплектности продукции требованиям конструкторской и нормативно-технической документации (НТД) и применения ее в соответствии с протоколами разрешения;
- накопление статистических данных о фактическом уровне качества получаемой продукции и разработка на этой основе предложений по повышению качества и, при необходимости, пересмотра требований НТД на продукцию. При необходимости потребитель может проводить дополнительные проверки продукции, не предусмотренные требованиями действующей НТД. Объем и методы проверок согласовываются между потребителем и поставщиком;
- периодический контроль за соблюдением правил и сроков хранения продукции поставщиков.

В состав перечисленных выше видов контроля (входной, операционный, выходной и т. д.) могут быть включены различные методы и средства контроля [10].

Основным нормативным российским документом, регламентирующим методы измерения электрических параметров и определения характеристик аналоговых микросхем, является ГОСТ 19799-74 [6]. Читатель может убедиться в этом, заглянув на сервер www.gost.ru или в указатель действующих стандартов, имеющийся в библиотеке университета (предприятия). Этот стандарт применяется в России при разработке приборов (тестеров) и установок для измерения электрических параметров микросхем, при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также регламентирует отношения изготовителя и потребителя ИМС в процессе согласования и пересмотра частных технических условий (ЧТУ) на конкретные типы микросхем. ЧТУ (иногда просто ТУ) в соответствии с российским законодательством устанавливают методы измерения электрических параметров с указанием конкретных измерительных приборов. Обращаю внимание читателей на то, что именно ТУ или, в отдельных случаях, страницы (сайты, серверы) фирм-изготовителей в INTERNET, а не случайные справочники, в большом количестве появившиеся в последнее время на прилавках наших книжных магазинов, могут дать информацию для обоснования претензий изготовителям (поставщикам) некачественных ИМС.

В стандарте [6] приводятся структурные схемы различных методов измерений без указания конкретных средств измерений. Методы (их в стандарте более 130) сгруппированы в 9 классов. Классификационным признаком является вид размерности измеряемого параметра. Каждый метод имеет четырехзначный цифровой код (номер) — 1000 – 9000. Первая цифра кода определяет класс, а три последующие — номер внутри класса, причем последняя цифра номера, как правило, 0. Если последняя цифра другая, то перед нами разновидность ранее описанного метода, номер которого оканчивается на 0. Две средние цифры, по существу, означают номер измеряемого параметра, а последняя цифра — порядковый номер метода измерения данного параметра.

Класс 1000 образуют методы измерений электрических параметров, имеющих размерность напряжения. Электрические параметры, имеющие размерность тока, объединены в класс 2000. В классах

3000, 4000, 5000, 7000, 8000 собраны методы измерения электрических параметров, имеющих соответственно размерности мощности, частоты, времени, сопротивления и пр. (скорость нарастания, крутизна преобразования, фазовый сдвиг и т. п.). Достаточно многочисленный класс 6000 образуют методы измерения относительных (безразмерных) параметров. И наконец, в классе 9000 собраны методы определения нагрузочных, амплитудных, амплитудно- и фазочастотных характеристик.

В качестве примера рассмотрим метод 6501 — измерение коэффициента усиления напряжения (K_{yU}) для микросхем с одним входом. Структурная схема для измерения K_{yU} приведена на рис. 1.1.

Метод рекомендуется применять при испытаниях микросхем с малым входным сигналом. Он позволяет уменьшить погрешность измерения K_{yU} , связанную с погрешностью измерителя переменного напряжения. При измерениях на высоких частотах в качестве делителя допускается использовать высокочастотный калиброванный аттенуатор.

Основные элементы, входящие в структурную схему, должны удовлетворять требованию

$$R_2 \ll 0,01R_{вх},$$

где $R_{вх}$ — входное сопротивление микросхемы.

Напряжение питания $E1$ подается на микросхему 2 от источника 3. Измеряют напряжение $U_{вых}$ Γ на выходе генератора 1. Затем переключатель $B1$ переводят из положения 1 в положение 2 и измеряют напряжение $U_{вых}$ на выходе микросхемы 2 измерителем 4.

Коэффициент усиления напряжения определяют по формуле

$$K_{yU} = \frac{K_{делU} U_{вых}}{U_{вых} \Gamma},$$

где $K_{делU}$ — коэффициент деления делителя, включенного на входе микросхемы, определяемый по формуле

$$K_{делU} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}.$$

Коэффициент $K_{делU}$ рекомендуется выбирать равным номинальному значению коэффициента усиления напряжения испытываемой микросхемы.

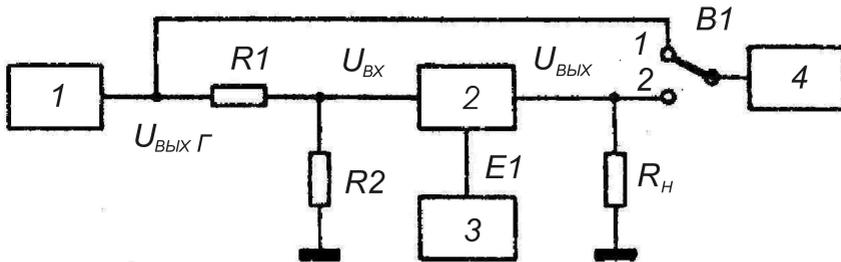


Рис. 1.1. Схема измерения коэффициента усиления

При технической реализации приведенной на рис. 1.1 схемы в любом автоматизированном тестере возникают некоторые принципиальные трудности. Одна из них связана с обеспечением уровня начального отсчета для сигналов воздействия и измерения [9, с. 195] и представляет собой довольно сложную задачу при проектировании контрольно-измерительного оборудования. Дело в том, что понятия для проводов "Общий", "Земля", "Нулевая шина" означают, что данный провод через хорошее проводящее соединение связан непосредственно с корпусом установки. Однако такого, казалось бы надежного, соединения для измерительного оборудования недостаточно. Действительно, если соединить все узлы и блоки измерительной установки единым проводом, то, как бы велико не было его сечение, при включенной установке в разных точках этого провода всегда окажутся различные потенциалы. Следовательно, разные блоки тестера будут создавать или измерять сигналы с различным напряжением смещения, что приведет к неправильному формированию воздействий и к дополнительным погрешностям измерения. В наибольшей степени это проявится в процессе так называемых "дистанционных" измерений, когда испытываемая микросхема подключается к тестеру с помощью зондовой установки (измерения на пластине) или кабелей, соединяющих тестер с термостатом, камерой влаги и т. п.

Выходом из положения является использование дополнительной

шины, часто называемой "измерительным нулем", "измерительной землей" и т. д. Схема поддержания нулевого потенциала (рис. 1.2, слева) предусматривает использование двух проводов, подключаемых к соответствующему выводу микросхемы. Аналогичным образом на вывод микросхемы подается заданный потенциал с помощью программного источника напряжения (рис. 1.2, справа). Назначение программного источника напряжения состоит в том, чтобы формировать заданное напряжение на выводе ИМС. Кремниевые диоды $D1$ и $D2$, включенные встречно-параллельно, обеспечивают защиту устройств формирования потенциала при случайном разъединении силового провода и провода обратной связи (ОС).

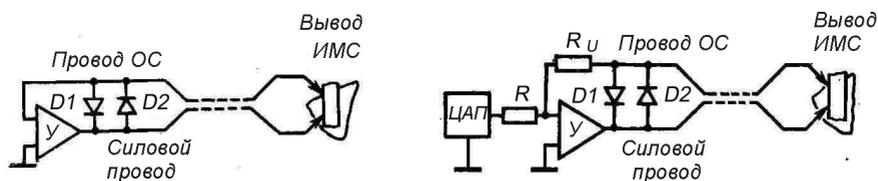


Рис. 1.2. Схемы поддержания потенциала

При измерении электрических параметров микросхем с помощью автоматизированных измерительных установок стандарт допускает применение других методов измерения, не указанных в нем. При этом погрешность измерения должна соответствовать погрешности на измеряемый параметр, указанной в ЧТУ на микросхеме. Стандарт не ограничивает перечень коммутирующих элементов, применяемых для автоматизации измерений, требуя лишь обеспечение точности, указанной в ЧТУ. Характер и значение нагрузки R_H и схема ее подключения также указываются в ЧТУ. При необходимости емкость и индуктивность монтажных проводов, испытательных зажимов и измерительных приборов, подключаемых к выходу микросхемы, учитывают в параметрах нагрузки.

Эти безобидные на первый взгляд формулировки стандарта [6] в целом ряде случаев могут стать серьезным препятствием для использования автоматизированных тестеров иностранного производства в качестве средств контроля отечественных микросхем. Ведь разра-

ботчики и изготовители этих тестеров, в общем-то, не обязаны соблюдать требования российского стандарта. Ситуация усложняется и при попытке организовать входной контроль микросхем зарубежного производства, технические условия на поставку и применение которых также не всегда учитывают требования российских стандартов. Формальное несоответствие стандарту может создать дополнительные трудности при сертификации электронных средств. Таким образом, практическая разработка и внедрение в производство технологии контроля интегральных микросхем связаны с решением комплекса не только технических, но и юридических проблем. Комплексное их решение предполагает более тесную интеграцию российских предприятий — производителей и потребителей интегральных микросхем — в мировой процесс производства электронных средств.

Раздел 2.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕСТЕР TR-9574

2.1. Общие сведения

Автоматизированный тестер аналоговых интегральных микросхем TR-9574 венгерской фирмы EMG (см. первую страницу обложки) представляет собой быстродействующую интеллектуальную двухпроцессорную измерительную систему для параметрического контроля, классификации и сортировки четырех типов интегральных микросхем или аналогичных им по характеристикам электронных средств: операционных усилителей, стабилизаторов напряжения, компараторов напряжения и повторителей напряжения. В одном корпусе (на одном кристалле) может находиться до четырех микросхем одного из указанных типов.

Тестер имеет в своем составе энергонезависимое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) со специализированным системным программным обеспечением емкостью 48 Кбайт, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) для ввода переменной части испытательной программы емкостью 4 Кбайта и перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ) на ИМС с комплементарными структурами металл-окисел-полупроводник (КМОП ИМС) емкостью 32 Кбайта с библиотекой составленных пользователем программ измерений (до 80 программ на 2 страницах). Для защиты записанной в ППЗУ информации при выключении тестера из сети с напряжением 220 В предусмотрена батарея из 3 гальванических элементов с номинальным напряжением 1,5 В каждый. Она размещается внутри корпуса тестера. Таким образом ППЗУ программ является энергонезависимым до тех пор, пока батарея полностью не разрядится. Возможна замена батареи в подключенном к сети тестере без потери информации в ППЗУ.

Для контроля и измерений микросхема устанавливается в контактирующее приспособление так называемого адаптера — специально изготовляемого устройства (рис. 2.1). Плата адаптера, в свою оче-

редь, имеет два ряда контактов для подключения к тестеру. Разъем подключения адаптера расположен на передней панели тестера слева от клавиатуры (рис. 2.2). Тестер комплектуется универсальными заготовками для быстрого изготовления новых адаптеров, а также набором типовых адаптеров для распространенных ИМС. На заднюю панель тестера выведены разъемы для подключения питания и внешних устройств, а также два регулятора: яркость (INTENSITY) и контрастность (CONTRAST) (рис. 2.3).

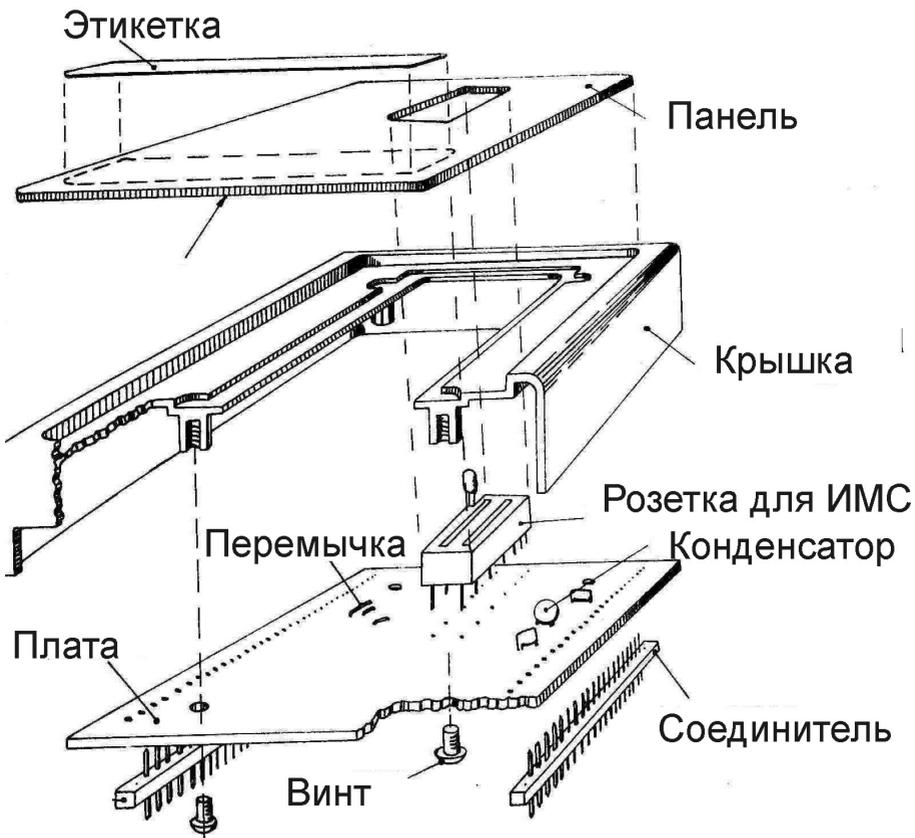


Рис. 2.1. Конструкция адаптера

Ввод новой программы измерений производится с помощью встроенной клавиатуры в диалоговом режиме. Проблемно-ориентированный интерфейс системного программного обеспечения существенно облегчает эту задачу даже для тех пользователей, которые слегка владеют английским языком, — тестер выдает на дисплей ограниченный набор простых и достаточно понятных сообщений на английском языке.

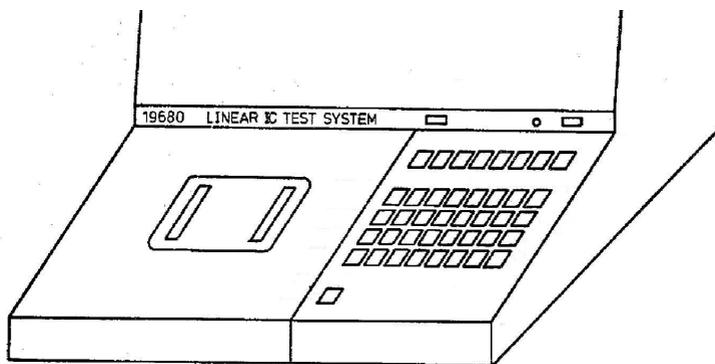


Рис. 2.2. Клавиатура и разъем подключения адаптера

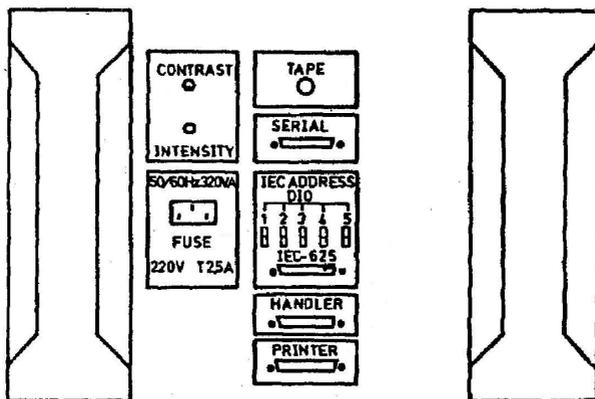


Рис. 2.3. Тестер TR-9574: вид сзади

2.2. Состав и диапазоны контролируемых параметров

Состав контролируемых параметров определяется типом ИМС. Диапазоны измерений и соответствующие им значения разрешающей способности и погрешности измерений приведены из технического описания тестера TR-9574. Обозначения параметров соответствуют документации фирмы EMG — изготовителя прибора. Для справки в скобках $\langle \dots \rangle$ приведены соответствующие буквенные обозначения по ГОСТ 19480-74 [5], если они отличаются от фирменных.

Операционные усилители

Параметрический контроль операционных усилителей предусматривает измерение 19 параметров, в том числе тока потребления по цепям питания $\pm I_{CC}$ ($I_{\text{ПОТ}}$) (табл. 2.1) и напряжения смещения V_{OS} ($U_{\text{СМ}}$) (табл. 2.2).

Таблица 2.1. Измерение тока потребления $\pm I_{CC}$

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мкА	0,1 мкА	$\pm (2 \% + 10 \text{ мкА})$
31,2 - 500 мкА	1 мкА	$\pm (2 \% + 20 \text{ мкА})$
312 - 5000 мкА	10 мкА	$\pm (2 \% + 50 \text{ мкА})$
3,12 - 50 мА	100 мкА	$\pm (2 \% + 400 \text{ мкА})$
31,2 - 130 мА	1 мА	$\pm (2 \% + 1 \text{ мА})$

Если $I_{cc} > 130$, то на экран дисплея выводится сообщение **OVER**. Сообщение **DUT SHORT** на экране дисплея означает, что $I_{cc} > 2I_{cc\text{lim}}$, где $I_{cc\text{lim}}$ — граничное (по ТУ) значение тока потребления. В случае $I_{cc} < \frac{I_{cc\text{lim}}}{16}$ появляется сообщение **DUT OPEN**, предупреждающее о возможном отсутствии контактирования (слишком мал ток потребления).

Напряжение смещения определяется как значение последовательного с входом напряжения, за счет которого выходной уровень достигает значения 0 В. При этом выводы компенсации смещения должны оставаться свободными. Испытание проводится при номинальных напряжениях питания и без нагрузки на выходе.

Таблица 2.2. Измерение напряжения смещения V_{OS}

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мкВ	0,1 мкВ	$\pm (1 \% + 20 \text{ мкВ})$
31,2 - 500 мкВ	1 мкВ	$\pm (1 \% + 20 \text{ мкВ})$
312 - 5000 мкВ	10 мкВ	$\pm (1 \% + 40 \text{ мкВ})$
3,12 - 50 мВ	100 мкВ	$\pm (1 \% + 400 \text{ мкВ})$
31,2 - 500 мВ	1 мВ	$\pm (1 \% + 4 \text{ мВ})$

Контроль возможности балансировки напряжения смещения V_{OSBAL} проводится по принципу ГОДЕН/НЕ ГОДЕН. При этом между выводами компенсации с помощью реле включается резистор, который замещает балансирующий потенциометр. ИМС проверяется с помощью схемы для измерения напряжения смещения. Соответствующие напряжения питания с помощью реле подключаются сначала на первый вывод балансировки, а затем — на второй. В обоих случаях производится измерение напряжения смещения. Если знаки полученных значений напряжения смещения различные, то выдается сообщение ГОДЕН, а если знаки одинаковые — НЕ ГОДЕН.

Входные токи I_{b+} ($I_{ВХ}$) и I_{OS} ($\Delta I_{ВХ}$) измеряются, а I_{b-} и I_{bias} рассчитываются (табл. 2.3). Входной ток неинвертирующего входа I_{b+} измеряется при условии нулевого выходного напряжения и отсутствии нагрузки на выходе. Входной ток инвертирующего входа определяется по формуле

$$I_{b-} = I_{b+} - I_{OS},$$

где разность входных токов I_{OS} измеряется аналогично I_{b+} . Средний входной ток рассчитывается по формуле

$$I_{bias} = \frac{I_{b+} + I_{b-}}{2}.$$

В состав контролируемых параметров входят также: максимальная амплитуда выходного напряжения $\pm V_{out}$ ($U_{ВЫХ.max}$) (табл. 2.4), коэффициент усиления по напряжению сигнала большого уровня при

открытой петле обратной связи $\pm GAIN$ (K_{yU}), коэффициент ослабления синфазных входных сигналов $\pm CMRR$ ($K_{oc.cф}$), коэффициент ослабления влияния изменений величины напряжения питания $\pm PSRR$ (табл. 2.5), произведение коэффициента усиления на полосу пропускания (площадь усиления) $GBWP$ (табл. 2.6).

Таблица 2.3. Измерение входных токов

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 пА	0,1 пА	$\pm (1 \% + 10 \text{ пА})$
31,2 - 500 пА	1 пА	$\pm (1 \% + 20 \text{ пА})$
312 - 5000 пА	10 пА	$\pm (1 \% + 40 \text{ пА})$
3,12 - 50 нА	100 пА	$\pm (1 \% + 400 \text{ пА})$
31,2 - 500 нА	1 нА	$\pm (1 \% + 4 \text{ нА})$
312 - 5000 нА	10 нА	$\pm (1 \% + 40 \text{ нА})$
3,12 - 50 мкА	100 нА	$\pm (1 \% + 400 \text{ нА})$

Таблица 2.4. Измерение максимальной амплитуды выходного напряжения

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мВ	0,1 мВ	$\pm (1 \% + 2 \text{ мВ})$
31,2 - 500 мВ	1 мВ	$\pm (1 \% + 10 \text{ мВ})$
312 - 5000 мВ	10 мВ	$\pm 1 \%$
3,12 - 50 В	100 мВ	$\pm 1 \%$

Максимальная амплитуда выходного напряжения $\pm V_{out}$ представляет собой то пиковое напряжение, которое может обеспечиваться усилителем на выходе при допустимом уровне искажений.

Коэффициент усиления по напряжению сигнала большого уровня при открытой петле обратной связи $\pm GAIN$ (дБ) рассчитывается как отношение приращения выходного напряжения к такому приращению входного напряжения, которое требуется для перевода выходного напряжения от нулевого значения до заданного уровня выходного напряжения. Измерение производится после компенсации напряжения смещения. Коэффициент ослабления синфазных входных сигналов $\pm CMRR$ (дБ) определяется как отношение прираще-

ния синфазного напряжения к вызванному этим приращением изменению напряжения смещения. Коэффициент ослабления влияния нестабильности напряжения питания $\pm PSRR$ (дБ) определяется как отношение изменения напряжения одного из источников питания к вызванному данной процедурой изменению напряжения смещения.

Таблица 2.5. Измерение коэффициентов усиления и ослабления

Диапазон	Разрешение	Погрешность
26 - 50 дБ	0,1 дБ	± 2 дБ
46 - 70 дБ	0,1 дБ	± 2 дБ
66 - 90 дБ	0,1 дБ	± 5 дБ
86 - 110 дБ	1 дБ	± 10 дБ
106 - 130 дБ	1 дБ	± 20 дБ

Таблица 2.6. Измерение площади усиления

Диапазон	Разрешение	Погрешность
20 - 200 кГц	1 кГц	$\pm (5 \% + 80 \text{ кГц})$
0,2 - 2 МГц	10 кГц	$\pm (5 \% + 80 \text{ кГц})$
2 - 20 МГц	100 кГц	$\pm (5 \% + 0,8 \text{ МГц})$
20 - 200 МГц	1 МГц	$\pm (10 \% + 0,8 \text{ МГц})$

Вместо площади усиления $GBWP$ в отечественной практике обычно измеряют граничную частоту усиления, однако алгоритм измерений $GBWP$ позволяет вычислить указанный параметр, поскольку при измерении тестером параметра $GBWP$ подразумевается, что амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя имеет постоянную времени первой степени, то есть уменьшение коэффициента усиления имеет крутизну -20 дБ/декада. На результаты измерений существенно влияют значения блокировочных емкостей, подключаемых для предотвращения самовозбуждения усилителя. В конечном итоге измерение площади усиления в тестере сводится к измерению коэффициента усиления (отн. ед.) на частоте 10 кГц. Затем это значение умножается на 10 кГц. Результат измеряется в герцах, но это не граничная частота усиления.

Максимальная скорость нарастания сигнала *SLEWRATE* (*SR*) или $\pm SLEW$ ($V_{U\text{вых}}$) измеряется в диапазоне 50 мВ/мкс – 1000 В/мкс с погрешностью $\pm \left(10 \% + \frac{0,5[\text{мкс}] SR[\text{В/мкс}]}{\Delta V_0[\text{В}]} \% \right)$ в случае $\Delta V_0 = 10$ В. Она представляет собой максимальную скорость нарастания выходного напряжения усилителя при высокоуровневых сигналах управления и при номинальных значениях напряжения питания. Измерение может проводиться при замкнутой или разомкнутой цепях обратной связи. В основе измерительного алгоритма – преобразование "частота – напряжение" с автоматической самокалибровкой коэффициента преобразования непосредственно перед измерением.

При проведении измерений перечисленных параметров операционных усилителей напряжения питания $+V_{CC}$ (E_1) и $-V_{CC}$ (E_2) могут устанавливаться в диапазоне 0 – 50 В при токе нагрузки не более 130 мА. Изменение напряжения питания ΔV_0 можно установить в диапазоне 0 – 50 В, а сопротивление нагрузки R_{LOAD} – в диапазоне 400 Ом – 50 кОм. Состояние исследуемого прибора *DUT* при измерении крутизны нарастания **Closed Loop=Y** (да) соответствует измерению при замкнутой петле обратной связи, а **Closed Loop=N** (нет) – разомкнутой петле обратной связи.

Повторители напряжения

При контроле повторителей напряжения измеряется ток потребления по цепям питания $\pm I_{CC}$ (табл. 2.7) и напряжение смещения V_{OS} (см. табл. 2.2).

Контроль баланса V_{OSBAL} проводится по принципу ГОДЕН/НЕ ГОДЕН. Входной ток I_{b+} измеряется с точностью, разрешающей способностью и в пределах, указанных в табл. 2.3.

Значения точности, разрешающей способности и пределы измерения максимальной амплитуды выходного напряжения $\pm V_{out}$ приведены в табл. 2.4.

Коэффициент усиления по напряжению $\pm GAIN$ измеряется при изменении напряжения питания $\Delta V_0 = 10$ В (табл. 2.8).

Таблица 2.7. Измерение тока потребления $\pm I_{CC}$

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мкА	0,1 мкА	$\pm (2 \% + 10 \text{ мкА})$
31,2 - 500 мкА	1 мкА	$\pm (2 \% + 20 \text{ мкА})$
312 - 5000 мкА	10 мкА	$\pm (2 \% + 50 \text{ мкА})$
3,12 - 5 мА	100 мкА	$\pm (2 \% + 400 \text{ мкА})$
31,2 - 130 мА	1 мА	$\pm (2 \% + 1 \text{ мА})$

Таблица 2.8. Измерение коэффициента усиления по напряжению сигнала большого уровня

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0,9523 - 0,9969	0,0001	$\pm 0,1 \%$
0,9950 - 0,9997	0,0001	$\pm 0,03 \%$
0,9995 - 1,000	0,0001	$\pm 0,02 \%$

Возможности тестера при измерении коэффициента ослабления влияния изменений величины напряжения питания $\pm PSRR$ отражены в табл. 2.5.

Максимальная скорость нарастания сигнала SR или $\pm SLEW$ при $\Delta V_0 = 10 \text{ В}$ измеряется в диапазоне 50 мВ/мкс – 256 В/мкс с погрешностью $\pm \left(10 \% + \frac{0,5[\text{мкс}] SR[\text{В/мкс}]}{\Delta V_0[\text{В}]} \% \right)$.

Выходное сопротивление R_{out} измеряется согласно табл. 2.9.

Таблица 2.9. Измерение выходного сопротивления

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 2 Ом	10 мОм	$\pm (5 \% + 15 \text{ мОм})$
2 - 20 Ом	100 мОм	$\pm (5 \% + 100 \text{ мОм})$
20 - 200 Ом	1 Ом	$\pm 5 \% \text{ В}$

При проведении измерений параметров операционных усилителей напряжения питания $+V_{CC}$ и $-V_{CC}$ могут устанавливаться в диапазоне 0 – 50 В при токе нагрузки не более 130 мА. Изменение напряжения питания ΔV_0 можно установить в диапазоне 0 – 50 В, а сопротивление нагрузки R_{LOAD} – в диапазоне 400 Ом – 50 кОм.

Компараторы напряжения

Ток потребления по цепям питания $\pm I_{CC}$ измеряется в соответствии с табл. 2.7. Ток потребления от опорного источника $\pm I_d$ измеряется в соответствии с табл. 2.10.

Таблица 2.10. Измерение тока потребления от опорного источника

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мА	10 мкА	$\pm (2 \% + 100 \text{ мкА})$
3,12 - 20 мА	100 мкА	$\pm (2 \% + 200 \text{ мкА})$

Напряжение смещения V_{OS} контролируется с характеристиками, приведенными в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Измерение напряжения смещения V_{OS}

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 500 мкВ	1 мкВ	$\pm (1 \% + 100 \text{ мкВ})$
312 - 5000 мкВ	10 мкВ	$\pm (1 \% + 200 \text{ мкВ})$
3,12 - 50 мВ	100 мкВ	$\pm (1 \% + 500 \text{ мкВ})$
31,2 - 500 мВ	1 мВ	$\pm (1 \% + 1 \text{ мВ})$

Баланс V_{OSBAL} контролируется по принципу ГОДЕН/НЕ ГОДЕН. Входные токи I_{b+} и I_{b-} измеряются, а I_{OS} и I_{bias} рассчитываются (табл. 2.12).

Таблица 2.12. Измерение входных токов

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 500 пА	1 пА	$\pm (2 \% + 100 \text{ пА})$
312 - 5000 пА	10 пА	$\pm (2 \% + 200 \text{ пА})$
3,12 - 50 нА	100 пА	$\pm (2 \% + 400 \text{ пА})$
31,2 - 500 нА	1 нА	$\pm (2 \% + 4 \text{ нА})$
312 - 5000 нА	10 нА	$\pm (2 \% + 40 \text{ нА})$
3,12 - 50 мкА	100 нА	$\pm (2 \% + 400 \text{ нА})$

Ввиду того что I_{OS} рассчитан из I_{b+} и I_{b-} , погрешность I_{OS}

определяется диапазоном измерения I_{b+} и I_{b-} плюс половина остаточной погрешности диапазона.

Выходные напряжения V_{out} и V_{sat} , представляющие собой предельные значения положительного и отрицательного выходных напряжений, измеряются с точностью, разрешающей способностью и в диапазонах, указанных в табл. 2.4. Коэффициент усиления по напряжению $GAIN$ измеряется в диапазоне $10 - 10^6$ с погрешностью $\pm(5\% + GAIN \cdot 10^{-3}\%)$, если $10 < GAIN < 10^5$.

Контроль работы стробирования *STROBE* выполняется по принципу ГОДЕН/НЕ ГОДЕН. Входные токи стробирующего входа I_{sh} и I_{sl} , соответствующие высокому и низкому уровням стробирующего сигнала, измеряются в диапазонах с точностью и разрешающей способностью, указанными в табл. 2.13.

Таблица 2.13. Измерение входных токов I_{sh} и I_{sl} стробирующего входа

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мкА	0,1 мкА	$\pm (1\% + 10 \text{ мкА})$
31,2 - 500 мкА	1 мкА	$\pm (1\% + 20 \text{ мкА})$
312 - 5000 мкА	10 мкА	$\pm (1\% + 50 \text{ мкА})$
3,12 - 50 мА	100 мкА	$\pm (1\% + 400 \text{ мкА})$

Измерение времен задержки T_{pdth} и T_{pdhl} выполняется в диапазоне 0 – 250 мкс с погрешностью $\pm (10\% + 50 \text{ нс})$.

Условия измерений следующие: напряжения питания (положительное и отрицательное) могут быть установлены в диапазоне 0 – 50 В при токе нагрузки не более 130 мА. Опорное напряжение $+V_d$ может быть установлено в диапазоне 0 – 10 В при токе нагрузки не более 20 мА. Диапазон токов нагрузки I_{LOAD} 0 – 60 мА.

Стабилизаторы напряжения

Ток покоя $\pm I_q \langle I_{X.X} \rangle$ измеряется с разрешающей способностью, точностью и в диапазонах, указанных в табл. 2.14, где $d = 40 \text{ мкА}$, если применяется импульсная нагрузка.

Таблица 2.14. Измерение тока покоя стабилизатора $\pm I_{CC}$

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мкА	0,1 мкА	$\pm (2 \% + 10 \text{ мкА}) + d$
31,2 - 500 мкА	1 мкА	$\pm (2 \% + 20 \text{ мкА}) + d$
312 - 5000 мкА	10 мкА	$\pm (2 \% + 50 \text{ мкА}) + d$
3,12 - 50 мА	100 мкА	$\pm (2 \% + 400 \text{ мкА}) + d$
31,2 - 130 мА	1 мА	$\pm (2 \% + 1 \text{ мА}) + d$

Выходные напряжения высокого $V_0/V_r \uparrow$ и низкого $V_0/V_r \downarrow$ уровней измеряются с характеристиками, приведенными в табл. 2.4. Токи опорного источника $I_{adj} \uparrow$ и $I_{adj} \downarrow$ измеряются в диапазоне 1 мкА – 5 мА с погрешностью $\pm (2 \% + 5 \text{ мкА})$.

Возможности измерения коэффициента стабилизации по нагрузке $REG/ld \langle K_{НСI} \rangle$ и коэффициента стабилизации по входному напряжению $REG/ln \langle K_{НСU} \rangle$ характеризуются диапазонами изменения выходного напряжения соответственно в зависимости от нагрузки и по входному напряжению в пределах 0,5 мВ – 5 В с погрешностью $\pm(2 \% + 5\text{мВ})$.

Коэффициент подавления фона сетевого напряжения $RipRej \langle K_{СГ} \rangle$ измеряется на частоте 120 Гц в диапазоне 20 – 94 дБ с погрешностью ± 3 дБ.

Выходное сопротивление измеряется в диапазоне, с разрешающей способностью и погрешностью, указанными в табл. 2.15.

Контроль ограничения тока при коротком замыкании $I_{sc} \uparrow$ и $I_{sc} \downarrow$ сводится к испытанию по схеме "ГОДЕН/НЕ ГОДЕН". При этом ток нагрузки может быть установлен в диапазоне 0 – 60 мА с погрешностью $\pm(5 \% + 50 \text{ мкА})$ либо в диапазоне 60 мА – 9,99 А с погрешностью $\pm(5 \% + 10 \text{ мА})$.

Таблица 2.15. Измерение выходного сопротивления

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 0,4 Ом	1 мОм	$\pm (5 \% + 5 \text{ мОм})$
0,4 - 4 Ом	10 мОм	$\pm (5 \% + 50 \text{ мОм})$
4 - 40 Ом	100 мОм	$\pm (5 \% + 50 \text{ мОм})$

Контроль входных напряжений $V_{in} \uparrow$ и $V_{in} \downarrow$ и разности между входным и выходным напряжениями $V_{diff} \uparrow$ и $V_{diff} \downarrow$ также осуществляется по схеме "ГОДЕН/НЕ ГОДЕН". При этом напряжение на выходе устанавливается в диапазоне 0 – 50 В с погрешностью $\pm(2\% + 100 \text{ мВ})$. Измерение изменения напряжения на выходе от изменения входного напряжения выполняется в диапазоне 0,5 мВ – 5 В с погрешностью $\pm(2\% + 5 \text{ мВ})$.

Возможности контроля диапазона выходного напряжения в случае регулируемых стабилизаторов напряжения $V_{out} \uparrow$ и $V_{out} \downarrow$ показаны в табл. 2.16.

Таблица 2.16. Контроль диапазона выходного напряжения регулируемых стабилизаторов напряжения

Диапазон	Разрешение	Погрешность
0 - 50 мВ	0,1 мВ	$\pm (1\% + 2 \text{ мВ})$
31,2 - 500 мВ	1 мВ	$\pm (1\% + 10 \text{ мВ})$
312 - 5000 мВ	10 мВ	$\pm 1\%$
3,12 - 50 В	100 мВ	$\pm 1\%$

Условия измерения параметров стабилизаторов напряжения характеризуются диапазоном положительных и отрицательных входных напряжений ΔV_{in} от 0 до 50 В при токе нагрузки не более 130 мА. Изменение входного напряжения можно установить в диапазоне 0 – 50 В. Диапазон устанавливаемого тока нагрузки I_{LOAD} 0 – 9,99 А, а диапазон изменения тока нагрузки ΔI_{LOAD} 0 – 9,99 А.

2.3. Сопряжение с внешними устройствами

Результаты измерений, полученные на тестере TR-9574, могут быть переданы на внешние устройства для документирования и последующей обработки. Для подключения принтеров РОБОТРОН-1154 или TMT-120 на задней стенке прибора имеется специальный разъем "PRINTER" (см. рис. 2.3). Расположенный рядом с ним разъем с обозначением "SERIAL" соответствует стандартному интерфей-

су RS-232C. Для вывода результатов измерений на печать к этому разъему необходимо подключить матричный принтер типа SX-85 с платой указанного интерфейса.

Содержимое библиотеки (КМОП-памяти) программ измерений может либо выдаваться на внешние устройства, либо обновляться с их помощью. Для этой цели служат стандартный многопроводный канал общего пользования (КОП) и магнитофонный вход-выход.

Магистральный интерфейс КОП, выведенный на разъем "IEC-625", соответствует ГОСТ 26.003-80, а также стандарту Международной электротехнической комиссии МЭК-625. Рядом с указанным разъемом расположены пять двухпозиционных переключателей задания адреса тестера. С их помощью тестеру можно поставить в соответствие один из 32 двоичных адресов. Это необходимо сделать в том случае, если к информационной магистрали подключены одновременно несколько различных измерителей, управляемых одним компьютером. Магнитофонный вход-выход выведен на разъем "TAPE". Формат записи на магнитную ленту не является стандартным и подробно определен в технической документации на прибор.

Через разъем "HANDLER" тестер может быть подключен к устройству для автоматической подачи микросхем на измерения с последующей сортировкой их на группы (до 5 групп).

Наиболее удобным и доступным каналом ввода результатов измерений в персональный компьютер IBM PC является двунаправленный параллельный порт принтера (LPT-порт). Обращаем внимание читателя на то, что далеко не у всех IBM-совместимых компьютеров порт принтера двунаправленный, то есть информационный байт (8 бит) либо прочитан, либо выставлен для передачи. Схема соединений и программа обмена данными между тестером и двунаправленным параллельным портом LPT персонального компьютера IBM PC разработаны ассистентом кафедры КТ РЭС С.А. Савенко.

Персональные компьютеры фирмы IBM классов 286, 386, 486, как правило, снабжены однонаправленным LPT-портом, то есть информационный байт (8 бит) только выставлен для передачи информации на принтер. Для информационного обмена с такими компьютерами рекомендуется использовать имитатор двухканального 16-раз-

рядного программируемого параллельного интерфейса (ППИ), подключаемый к однонаправленному LPT-порту.

Этот имитатор разработан и изготовлен на кафедре КТ РЭС ВлГУ совместно с ОАО «Владимирский завод "Электроприбор"» под руководством и при участии автора данного пособия, а также студентов А.В. Карпухина, С.И. Беспалова и А.С. Молокова. Программа обмена данными между тестером и портом LPT персонального компьютера IBM через имитатор ППИ разработана студентом С.А. Крушатиным под руководством и при участии ассистента кафедры КТ РЭС С.А. Савенко.

2.4. Особенности эксплуатации и диагностика ошибок

Питание тестера осуществляется от однофазной сети переменного тока с напряжением 220 В. Для подключения прибора к сети используются трехпроводной кабель с "евровилкой" и трехконтактная "евророзетка". Это гарантирует одновременно подключение и защитное зануление прибора и тем самым избавляет от необходимости занулять металлические части корпуса дополнительным проводом. Попытка вставить вилку прибора в обычную сетевую розетку с двумя контактами при выполнении лабораторных работ является нарушением правил охраны труда.

Прибор включается и выключается клавишей "Power" (Сеть). По мере разогрева электронно-лучевой трубки дисплея на его экране можно наблюдать результаты самотестирования отдельных блоков и элементов измерителя. Если строка результатов измерений (*обозначение параметра, номинальное и измеренное значения, верхний и нижний допустимые пределы*) выводится на темном фоне, то по данному внутреннему параметру тестер исправен. О неисправности прибора сообщает светлый фон строки (инверсная строка) и выход измеренного значения за указанные пределы. Индикация отдельных неисправностей сопровождается выдачей рекомендаций, например, о необходимости замены разряженной батареи КМОП-памяти программ.

Самотестирование приостанавливается в случае появления ин-

версных строк и может быть продолжено нажатием клавиши "Enter". В конце этого процесса на экране монитора появляется итоговое сообщение о замеченных неисправностях. После нажатия клавиши "Enter" на экране появляется текстовое приветствие – приглашение к диалогу. Для возвращения к этому тексту в процессе работы с тестером необходимо нажать клавишу "Reset".

Подробные инструкции по дальнейшей работе с тестером TR-9574 приведены в соответствующих лабораторных заданиях разд. 4.

В данном разделе ограничимся кратким перечнем возможных сообщений об ошибках измерений:

1. I_{cc} **LIMIT NOT SPECIFIED** – строка предельных отклонений токов потребления не была заполнена по команде **TEST LIMIT**.

2. **DUT SHORT** – величина тока потребления превышает двукратное предельное значение либо больше 130 мА.

3. **DUT OSCILLATION** – самовозбуждение ИМС в диапазоне 100 кГц – 1 МГц, что указывает на отсутствие на плате адаптера электрорадиоэлементов, предусмотренных ТУ для компенсации самовозбуждения.

4. **DUT OPEN** – при измерении тока потребления получается величина менее 1/16 заданного предельного значения, что указывает на возможное отсутствие контакта ИМС с адаптером или адаптера с тестером.

5. V_{os} **ERROR (HARDWARE LIMIT)** – напряжение смещения недопустимо велико (> 500 мВ).

6. $I_{b+or}I_{os}$ **ERR (HARDWARE LIMIT)** – входной ток более 50 мкА.

7. R_{up} **LESS THAN LIMIT** – сопротивление между выходом и источником питания менее 100 Ом, что недопустимо для тестера.

8. **OUTLEVEL ERROR** ($V_{oh} - V_{ol}$) < 1 В – диапазон выходного напряжения компаратора меньше 1 В.

Раздел 3.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Автор не ставит своей целью подробно излагать здесь теоретические основы математической статистики. Предполагается, что читатель знаком с теорией в объеме, не допускающем, например, отождествления математической статистики со статистикой экономической. Последнюю не без оснований часто называют второй ложью после дипломатии, что к математической статистике, как известно, никакого отношения не имеет.

Нет особой необходимости, да и возможности, превращать данный раздел в путеводитель по многочисленным компьютерным программам типа Statistika, MathCad, MathLab, LabView и др. Эту трудную задачу без особого пока успеха пытаются решать информационно-аналитические серверы в сети INTERNET, например: www.citforum.ru, www.exponenta.ru, www.matlab.ru и www.informika.ru. Читатель самостоятельно решит, каким программным продуктом целесообразно воспользоваться для статистической обработки результатов контроля.

Известный русский математик и механик академик А.Н. Крылов очень образно сравнил аппарат математической статистики с мельницей для "обмолота" экспериментальных результатов. Глубина этого сравнения заключается еще и в том, что мельница здесь рассматривается не только как разновидность инструмента. Ведь для процесса помола в определенном смысле безразлично, что в эту мельницу засыпают (хотя ее можно заставить перемолоть различные материалы). Засыпав пшеничное зерно, мы получаем полезный пищевой продукт, а мука из речного песка для питания не годится. Это означает, в частности, необходимость весьма тщательного формирования исходных массивов для статистической обработки.

В эпоху трудоемких "рукопашных" расчетов исследователь, который чаще всего сам же и выполнял эту работу, задумывался о

смысле проводимых расчетов и качестве исходной информации. Действительно, зачем зря время и силы тратить, если заранее знаешь, что трудная работа не имеет смысла.

Компьютеризация статистических расчетов позволила механизировать и автоматизировать трудоемкий процесс ручного вращения "мельничных жерновов". Однако в качестве побочного негативного следствия компьютеризации следует отметить нежелание отдельных "продвинутых" в компьютерном отношении инженеров (в том числе и будущих) тратить время на предварительный (априорный¹) анализ состава и структуры исходной статистической информации. Так появляются предпосылки для принятия ошибочных решений по результатам подобных некритичных статистических расчетов, что в конечном итоге ведет к дискредитации математической статистики как инструмента инженера.

Приведенные в подразд. 3.1 рекомендации, по мнению автора, позволят частично исправить ситуацию. По мере появления программных продуктов нового поколения с достаточным уровнем "встроенного интеллекта" актуальность этих рекомендаций безусловно снизится, однако пока они не будут лишними.

Подразд. 3.2 и 3.3 включены в состав лабораторного практикума потому, что в них излагаются оригинальные авторские методики, опубликованные в специальных изданиях [11, 12], которые, в силу ряда причин, могут оказаться недоступными читателю.

3.1. Общие рекомендации

Многолетний практический опыт применения автором методов математической статистики для решения задач управления технологическими процессами электроники позволяет обратить ваше внимание на следующие моменты методологического характера.

1. Основное назначение математической статистики — смысловое сжатие больших объемов числовой информации. С точки зрения психонейролингвистики – науки о том, как человек воспринимает и

¹*Apriori* – до опыта (лат.).

познает окружающий мир – это сжатие способствует формированию в сознании человека некоего виртуального образа исследуемого явления. В качестве примеров можно привести гистограмму и закон распределения случайной величины, корреляционную зависимость между случайными величинами, расслоение выборок в дисперсионном анализе, симметричную схему действия факторов из теории парной линейной корреляции, взаимосвязь законов распределения и числовых характеристик случайных величин через семейства кривых (ряды) Пирсона, Бородачева, Грама-Шарлье и т. д.

Образ позволяет осуществить "взгляд изнутри" на исследуемый объект, создать в реальном масштабе времени "эффект присутствия" как в глубине образа, так и на его поверхности. Образное мышление помогает человеку принять решение о своих дальнейших действиях. Именно образы, по мнению психонейролингвистов, составляют основу того, что мы называем знаниями об окружающем мире.

Статистические образы, такие как одномерный закон распределения (гистограмма), схема формирования многомерных законов распределения и др., с успехом могут быть использованы для получения "портретов" изготовителя или поставщика ИМС (см. подразд. 3.2). Отношение дисперсий технологической и измерительной погрешностей формирует образ статистической разрешающей способности средства измерений (см. подразд. 3.3).

2. Обычно, обращаясь к аппарату математической статистики, исследователи забывают², что большинство расчетных соотношений, статистических критериев и алгоритмов анализа экспериментальных данных предназначены для обработки случайных величин. Случайность величины (независимость одного ее значения от другого) в математической статистике рассматривается в связи с так называемой статистической устойчивостью, то есть особого рода закономерностью. Для характеристики этой закономерности в математической статистике вводится понятие стационарности случайной последовательности. Случайная последовательность результатов измерений может быть стационарной и нестационарной в зависимости от

²Имеются в виду те, которые раньше знали об этом.

постоянства во времени таких интегральных (образных) параметров (статистических моментов) случайной величины, как математическое ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесс и др.

Стационарность случайной последовательности результатов измерений является, в частности, одним из показателей стабильности технологического процесса изготовления ИМС и, как следствие, ожидаемого постоянства уровня надежности контролируемых изделий. Именно стационарность делает перечисленные статистические моменты интересными для практических приложений, связанных с принятием конкретных решений по результатам контроля ИМС. Нестационарность необязательно указывает на нестабильность технологического процесса изготовления, хотя это и не исключается, особенно для тех условий, в которых находятся отечественные изготовители ИМС. Причиной нестационарности часто бывает не критичное отношение к формированию последовательности результатов измерений, когда игнорируется групповой характер обработки изделий, характерный для технологии ИМС.

Если вы по ходу экспресс-анализа не усматриваете в потоке результатов измерений каких-либо закономерностей, то это отнюдь не значит, что перед вами случайная последовательность. Неслучайную закономерность (тренд) иногда сложно обнаружить визуально. Кроме существования тренда (монотонного или периодического) причиной неслучайного характера последовательности результатов контроля могут быть корреляционные связи, обусловленные, главным образом, групповым характером обработки ИМС (см. подразд. 3.2). Напоминаем, что корреляционная (линейная или нелинейная) зависимость между двумя случайными величинами может быть интерпретирована как зависимость (линейная или нелинейная) математического ожидания одной случайной величины от конкретного значения другой случайной величины. Если эту пару образуют последующее и предыдущее значения последовательности результатов контроля, то мы имеем здесь дело с автокорреляцией, которая делает последовательность неслучайной.

Наиболее часто ошибка, связанная с игнорированием неслучайного характера последовательности результатов измерений, проявля-

ется при попытке использовать операцию усреднения для повышения точности измерений. Следует иметь в виду, что базовая формула

$$\sigma_{M_x^*} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}},$$

связывающая среднеквадратичное отклонение выборочного среднего значения $\sigma_{M_x^*}$ со среднеквадратичным отклонением единичного измерения σ_x и количеством измерений n , "работает" только при условии, что отдельные измерения x_i случайным образом разбросаны относительно M_x^* , а σ_x является величиной постоянной, свидетельствующей о стационарности последовательности результатов измерений.

Свободно (и другими способами) распространяемые программные продукты, как это ни странно, в большинстве своем не предусматривают проверку последовательностей результатов измерений на случайность и стационарность³, хотя теоретически эти вопросы в математической статистике решены и соответствующие алгоритмы разработаны [8].

3. Начинающих исследователей, впервые обратившихся за практической помощью к аппарату математической статистики, порою обескураживает слегка отдающее мистикой требование компьютера задать доверительную вероятность или уровень значимости при проверке различных статистических гипотез. Напоминаем, что доверительная вероятность $p_{\text{дов}}$ связана с уровнем значимости α соотношением $p_{\text{дов}} + \alpha = 1$.

Пытливый исследователь быстро убеждается в том, что от заданной доверительной вероятности (уровня значимости) зависит (с точностью до наоборот) формулировка вывода о непротиворечии экспериментальных данных статистической модели (гипотезе). Серьезной методологической ошибкой в этом случае является обращение за помощью к аппарату математической статистики, несмотря на то, что некоторые "сердобольные" программные продукты услужливо подсказывают, какое значение надо задать, или, более того, сами задают это значение по умолчанию.

³Предлагаем читателю самостоятельно убедиться в этом.

Особенность математической статистики, как и других ориентированных на инженерные приложения разделов математики, состоит в том, что ответ на этот вопрос, увы, нельзя получить в рамках самой математической статистики. Государственные⁴ и отраслевые⁵ стандарты ограничивают выбор значений доверительной вероятности набором рекомендуемых значений, но не более того. Тут нужен совет опытного специалиста в конкретной области инженерной деятельности [9, 15, 16, 18]. Он поможет принять решение, однако не исключается коррекция этого решения по результатам собственной практической деятельности.

На наш взгляд, здесь будет уместна аналогия с регулированием люфта колеса какого-либо транспортного средства (велосипеда, мотоцикла, автомобиля). Те из читателей, которые знакомы с этой процедурой, знают, что окончательное решение принимает тот, в чьих руках гаечный ключ. Он может заглянуть в инструкцию, прислушаться к советам бывалого специалиста из автосервиса, в конце концов, попросить его установить необходимый зазор, от которого зависит долговечность подшипников, легкость хода и безопасность езды. Можно, конечно, обойтись и без советов, но . . .

Воспитанные на строгостях предельно корректной классической математики⁶ и одновременно избалованные кажущимися нам беспредельными возможностями вычислительной техники, мы порою с трудом привыкаем к тому, что успех решения математических задач в инженерных приложениях сегодня зависит не только от мощности компьютера на рабочем месте, но и от искусства инженера, его интуиции и практического опыта.

4. Аналогичные трудности возникают при оценке достаточности объема выборки для того, чтобы судить о статистических характеристиках так называемой генеральной совокупности, например, партии

⁴ГОСТ 11.001-73. Прикладная статистика. Ряды предпочтительных численных значений статистических характеристик.—М.: Изд-во стандартов, 1973.—12 с.

⁵ОСТ 11.6К0.012.001-72. Микросхемы интегральные. Исследование технологических процессов экспериментально-статистическими методами.—М.: Изд-во стандартов, 1973.—212 с.

⁶Которая, кстати, долго не хотела признавать право на жизнь математики обратных некорректных задач.

ИМС. Ответ на этот вопрос опять приводит нас к аналогии с регулировкой люфта колеса. Иначе говоря, один и тот же объем выборки в одной ситуации может оказаться небольшим, а в другой – вполне достаточным.

Чаще всего указанные трудности связаны с необходимостью учета эффектов малых выборок. Один из таких эффектов связан с систематическим смещением статистических характеристик, определяемых на выборке небольшого объема. Второй эффект связан с различными отклонениями законов распределения разных выборочных статистических характеристик от нормального закона при уменьшении объема выборки.

Как правило, перечисленные эффекты в серьезных программных продуктах свое отражение нашли. Остается лишь с помощью оценок экспертов, информационно-аналитических серверов и собственного опыта установить степень серьезности используемых вами программных продуктов.

5. Рекомендуем вам задуматься над следующими вопросами. Как вы полагаете, чему надо больше радоваться: опровержению выдвинутой гипотезы экспериментальными данными или наоборот? Как лучше сформулировать то, что будет наоборот: экспериментальные данные подтверждают гипотезу или гипотеза не противоречит экспериментальным данным?

Поиск ответов на эти вопросы приводит нас к важному методологическому выводу. Формулировка "эксперимент подтверждает гипотезу" успокаивает и может не оставить места для других гипотез, то есть для движения вперед. С этой точки зрения лучше сказать "гипотеза не противоречит экспериментальным данным". Следовательно, больше оснований радоваться опровержению гипотезы результатами эксперимента, если, конечно, у вас в запасе найдется другая гипотеза, которую этот эксперимент при том же уровне значимости и объеме выборки не опровергнет. Интересно, что в зарубежной литературе по прикладной математической статистике чаще встречается последняя формулировка, а в отечественных публикациях – предпоследняя.

6. Отдельные студенты старших курсов, и даже инженеры, за-

трудняются ответить на такой вопрос: почему именно гауссовский закон распределения $f(x)$ случайной величины x с математическим ожиданием M_x и среднеквадратичным отклонением σ_x , имеющий вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2} \right], \quad (3.1)$$

именуется нормальным законом распределения, и о чем свидетельствует эта нормальность? Ответ — в центральной предельной теореме теории вероятностей (теореме Ляпунова – Линдберга). Может быть, есть смысл еще раз повторить условия центральной предельной теоремы [18, с. 41].

Отклонения закона распределения от нормального справедливо являются основаниями для беспокойства технолога, анализирующего соответствующий технологический процесс. Он вынужден предпринимать некоторые действия, направленные на поиск и устранение причин отклонения закона распределения от вида (3.1). Иногда причину "ненормальности" закона распределения удастся выявить с помощью математического моделирования и исключить ее влияние расчетным путем [18, с. 152 – 165].

3.2. Статистические "портреты" поставщика ИМС

Статистические "портреты" поставщика (или изготовителя) ИМС, как правило, формируются на базе одномерных или многомерных законов распределения случайных величин, отображающих результаты параметрического или функционально-параметрического контроля ИМС [10].

Методика использования одномерных законов распределения в качестве статистических "портретов" поставщика (или изготовителя) ИМС подробно описана в доступных читателю изданиях [2, 18]. В основе ее так называемая теория одномерных распределений А.Н. Бородачева [18, с. 152 – 165]. Она дает объяснения причин отклонения одномерного закона распределения случайной величины от нормального закона (3.1), исходя из анализа особенностей произ-

водства изделий. К этой теории примыкает разложение произвольного закона распределения в ряд по нормальным законам распределения, известное как разложение (распределение) Грама-Шарлье⁷. Оно помогает, в частности, распознать партии микросхем, которые скомплектованы поставщиком из остатков от прошлого серийного производства электронных средств, для которого когда-то "с запасом" были закуплены ИМС. Не могут не настораживать, например, двумодальные ("двугорбые") дифференциальные функции распределения с провалом в районе математических ожиданий контролируемых параметров. Это чаще всего означает, что ваш поставщик произвел предварительный отбор наиболее стабильных ИМС для себя или другого потребителя, а вам поставил так называемые "хвосты" распределения. В этом случае повышенный уровень отказов полученных вами ИМС в вашей аппаратуре не должен быть для вас сюрпризом.

Подробнее остановимся на вариантах использования многомерных законов распределения в качестве статистических "портретов", так как с теоретической точки зрения есть необходимость сопоставить два подхода к изучению и "образному" представлению указанных законов.

Основной подход, достаточно подробно описанный в литературе, использует математический аппарат дисперсионного анализа [16, 18]. Он использует прием, именуемый расслоением последовательности результатов контроля на отдельные выборки. Это позволяет разделить дисперсию контролируемого параметра на несколько составляющих и таким образом получить статистический "портрет" поставщика ИМС. Аппарат дисперсионного анализа рекомендуется уже упоминавшимся отраслевым стандартом ОСТ 11.6К0.012.001-72 для контроля технологических процессов изготовления ИМС.

Автор считает, что создание диагностических систем контроля точности технологических процессов на базе процессорных средств операционного контроля привело к возникновению противоречия между изменившимся характером исходной статистической инфор-

⁷Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров.— М.: Наука, 1964. — 772 с.

мации, с одной стороны, и аппаратом дисперсионного анализа как наиболее распространенным средством разделения дисперсий контролируемых параметров на составляющие, с другой стороны. Основная причина указанного противоречия — переход от операционного контроля параметров рабочих элементов и схем к контролю специальных тестовых ИМС, элементов и структур, характерный для технологии БИС. Исходная статистическая информация для контроля точности в этих условиях представляет собой многомерную случайную последовательность, отличающуюся малым количеством попарно коррелированных длинных реализаций. Состав выборки весьма неоднороден, что и обуславливает низкую эффективность аппарата дисперсионного анализа, особенно при распределениях погрешностей, отличных от нормальных.

Альтернативным подходом является использование методов факторного анализа⁸. Для реализации этого подхода необходимо, во-первых, с учетом принятого варианта организации технологического процесса иметь модель взаимодействия исходных некоррелированных факторов, во-вторых, установить статистическую меру близости модели и реальной многомерной последовательности результатов операционного контроля. В качестве основы модели факторного анализа предлагается использовать симметричную аддитивную схему действия факторов, известную из теории корреляции⁹. В простейшем случае эта схема имеет вид:

$$\begin{cases} Y_1 = u + v_1; \\ Y_2 = u + v_2, \end{cases} \quad (3.2)$$

где Y_1 , Y_2 — случайные значения отклонений параметров тест-элементов Y_1 и Y_2 от их номинальных значений, u — случайное значение отклонения общего, а v_1 , v_2 — характерных технологических факторов от их номинальных значений, причем u , v_1 , v_2 — взаимно линейно не коррелированы, то есть не связаны линейными корреляционными зависимостями.

⁸Харман Г. Современный факторный анализ. — М.: Статистика, 1962. — 489 с.

⁹Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. — М.: Госстатиздат, 1964. — 388 с.

В ходе решения диагностических задач контроля точности была изучена структура реальных симметричных схем действия факторов, отличающихся многоуровневым характером. Для их описания предлагается использовать связные ациклические направленные графы — выходящие или корневые деревья¹⁰. Каждому ребру графа ставится в соответствие определенная составляющая технологической погрешности. Статистические характеристики составляющих погрешностей входят в набор инвариантов графа, т.е. чисел, которые принимают одно и то же значение на любом графе, изоморфном данному. Соотношения для центральных моментов образуют систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} D(Y_1) = D(u) + D(v_1); \\ D(Y_2) = D(u) + D(v_2); \\ cov(Y_1, Y_2) = D(u); \\ \mu_3(Y_1) = \mu_3(u) + \mu_3(v_1); \\ \mu_3(Y_2) = \mu_3(u) + \mu_3(v_2); \\ \mu_{12}(Y_1, Y_2) = \mu_3(u); \\ \mu_4(Y_1) = \mu_4(u) + \mu_4(v_1) + 6D(u)D(v_1); \\ \mu_4(Y_2) = \mu_4(u) + \mu_4(v_2) + 6D(u)D(v_2); \\ \mu_{22}(Y_1, Y_2) = \mu_4(u) + D(u)[D(v_1) + D(v_2)] + D(v_1)D(v_2), \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где $D(x)$ — дисперсия (второй основной центральный момент, или квадрат среднеквадратичного отклонения — с.к.о.) случайной величины x , в качестве которой могут быть Y_1, Y_2, u, v_1, v_2 ; $cov(Y_1, Y_2)$ — ковариация (смешанный центральный момент второго порядка) случайных величин Y_1 и Y_2 ; $\mu_3(x)$ — третий основной центральный момент случайной величины x ; $\mu_{12}(Y_1, Y_2)$ — смешанный центральный момент третьего порядка; $\mu_4(x)$ — четвертый основной центральный момент случайной величины x ; $\mu_{22}(Y_1, Y_2)$ — смешанный центральный момент четвертого порядка.

Для наглядности введем дополнительные ограничения:

- разрешенными будем считать пути (цепи) от точки 0 к точкам Y_1, Y_2 согласно направленности графа;
- разрешенные пути от источника 0 до вершин с нулевой степенью исхода будем именовать полными путями;

¹⁰Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 900 с.

— два ребра графа равны между собой, если им соответствует один и тот же набор инвариантов;

— количество вершин с нулевой полустепенью исхода определяет размерность графа;

— проекции ребер графа на произвольно выбранную ось $A - A$ равны дисперсиям соответствующих факторов. Для краткости будем в дальнейшем именовать граф, определенный таким образом, графом погрешностей.

Граф погрешностей может быть полным и приведенным. Поясним вводимые термины на примере. Структура полного графа погрешностей для n партий ИМС по три пластины, содержащих по четыре тест-структуры из двух элементов Y_1 и Y_2 каждая, изображена на рис. 3.1 слева от оси $A - A$, а на рис. 3.2 изображены структуры полного (слева от значений с.к.о.) и приведенного (справа от значений с.к.о.) графов погрешностей технологического процесса изготовления тонкопленочных плат с резисторами.

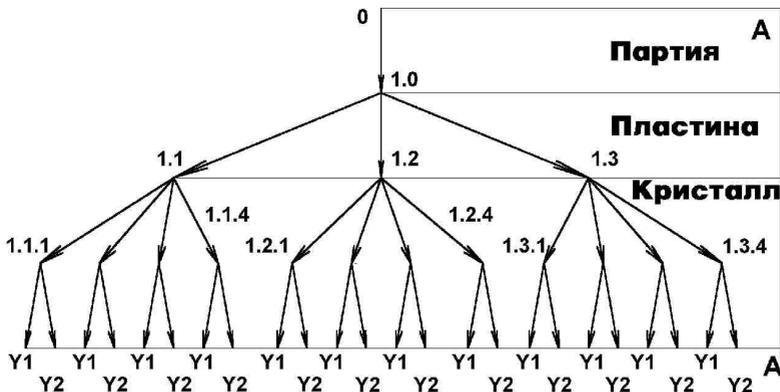


Рис. 3.1. Структура (теоретическая) графа технологических погрешностей элементов полупроводниковых ИМС

Величины в левой части уравнений (3.3) определяются с помощью первичной статистической обработки массива результатов операционного контроля \vec{Y} . Если существование факторов u , v_1 , v_2 обосновано с точки зрения сущности исследуемых явлений, то пра-

вомерна постановка задачи вероятностной идентификации (определения моментов распределений) этих факторов при известных $D(Y_1)$, $D(Y_2)$, $cov(Y_1, Y_2)$ и т.д. решением системы уравнений (3.2).

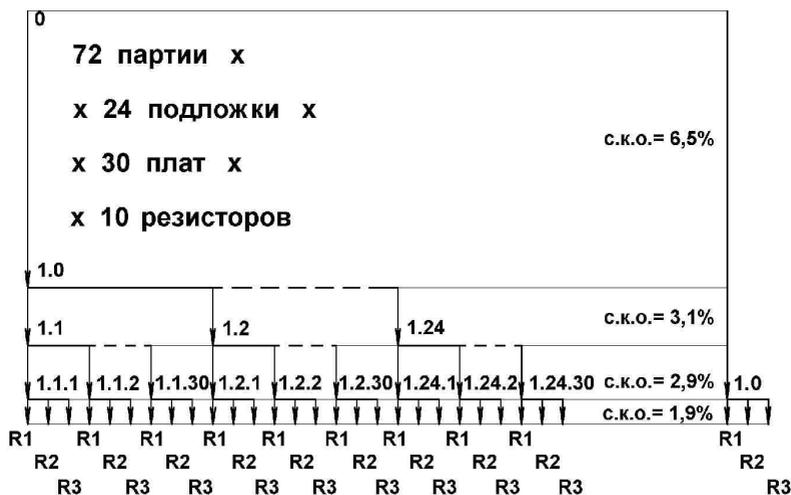


Рис. 3.2. Структуры (экспериментальные) полного и приведенного графов погрешностей изготовления тонкопленочных резисторов

Погрешность $\Delta(0 - 1.0)$ обусловлена групповым характером обработки партии. Погрешность $\Delta(1.0 - 1.1)$ характеризует влияние общей пластины и операций, производимых отдельно с каждой пластиной, а $\Delta(1.1 - 1.1.1)$ обусловлена наличием макронеоднородных свойств пластины и отклонениями различных пространственных диаграмм процессов обработки от равномерных, приводящими к возникновению общих составляющих погрешностей для элементов тест-структуры. Характерные составляющие $\Delta(1.1.1 - Y_1)$ и $\Delta(1.1.1 - Y_2)$ отражают индивидуальность тест-элементов Y_1 и Y_2 в пределах тест-структуры.

По сравнению с известным векторным представлением погрешностей¹¹ предложенная графическая интерпретация отличается боль-

¹¹Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС). – М.: Сов. радио, 1980. –252 с.

шей информативностью при решении диагностических задач, является графической формой паспорта стабильности технологического процесса, отражает принятый вариант организации операционных и производственных партий.

При определении инвариантов графа погрешностей сначала рассматриваются все возможные пары, позволяющие определить выборочные значения дисперсий вида $D^*[\Delta(0-1.0)]$. Если все полученные при этом выборочные значения не выходят за пределы установленного доверительного интервала при выбранном уровне значимости, то определяется среднее значение полученного массива $\bar{D}^*[\Delta(0-1.0)]$. В противном случае необходимо уточнять модель формирования погрешностей либо увеличивать длину реализации. Аналогично определяются составляющие любого уровня. Отдельные составляющие будут значимыми, если они существенно больше цены деления измерительного прибора, используемого для операционного контроля. Стандарты по контролю точности рекомендуют использовать измерительные средства с ценой деления шкалы не более $1/6$ минимального значения среднего квадратического отклонения случайной погрешности. Если это условие не выполняется, то соответствующее ребро графа погрешностей исключается и схема пересматривается.

В качестве оценки точности определения дисперсии $\bar{D}^*[\Delta(0-1.0)]$ целесообразно использовать предел, к которому стремится эта оценка при увеличении количества рассмотренных пар,

$$D[\bar{D}^*[\Delta(0-1.0)]] = \frac{2}{n} \bar{D}^{*2}[\Delta(0-1.0)], \quad (3.4)$$

а при оценке точности выборочных значений дисперсий $D^*[\Delta(1.0-1.1)]$, $D^*[\Delta(1.1-1.1.1)]$, $D^*[\Delta(1.1.1-Y1)]$ и т.д., кроме соотношения (3.4) необходимо учитывать коррелированность выборочных значений дисперсий $D^*[\Delta(0-1.0)]$, $D^*[\Delta(0-1.1)]$, $D^*[\Delta(0-1.1.1)]$, так как $D^*[\Delta(1.0-1.1)] = D^*[\Delta(0-1.1)] - D^*[\Delta(0-1.0)]$ и т.д. Например (см. рис. 3.2), если $D^*[\Delta(1.0-1.1)] \approx D^*[\Delta(1.0-1.2)] \approx D^*[(\Delta(1.0-1.3)]$ в статистическом смысле при заданном уровне значимости и можно найти среднее значение \bar{D}^* , то в первом приближении $D(\bar{D}^*) = \frac{2}{3} n \bar{D}^{*2}$.

Описание исходного статистического массива в виде графа погрешностей позволяет избежать характерных ошибок при оценке представительности так называемой "смешанной статистики", в которой наряду с независимыми результатами наблюдений имеются коррелированные. Для этого предлагается оперировать понятием "объем выборки относительно источника погрешностей". В соответствии с этим понятием при объединении всех двенадцати реализаций в одну (см. рис. 3.1) объем получившегося массива относительно источника $\Delta(1.0 - 1.1)$ будет равен $3n$, а относительно источника $\Delta(1.1 - 1.1.1) - 12n$.

Обоснование структуры полного графа погрешностей, описывающего управляемый технологический процесс, начинается с детального априорного анализа всех технологических факторов, систематизации их по уровням симметричной схемы действия факторов. Результаты анализа оформляются в виде таблицы, которая является приложением к графу погрешностей наряду с таблицей инвариантов графа. Будучи введенными в память компьютера, эти таблицы используются для выдачи информационно-советующих сигналов управления, указывая с точностью до группы факторов на причину нестабильности процесса. Количество групп факторов определяется организацией технологического процесса, точностью измерений при проведении операционного контроля, конструкцией тест-элементов и структур.

Использование статистических характеристик в качестве параметров технологического процесса при оценке точности предполагает случайный характер погрешностей изготовления ИМС, случайность и стационарность многомерных последовательностей результатов операционного контроля. Стационарность при использовании дисперсионного анализа обычно трактуется как воспроизводимость соответствующих распределений (дисперсий), а оценка случайности отклонений параметров тест-структур от номинальных значений, как правило, не проводится, что существенно снижает достоверность статистических оценок. Если нестационарность случайной последовательности указывает на наличие "эффекта оператора" или предупреждает о возможном отклонении точности процесса, то от-

рицательный результат при оценке случайности чаще всего свидетельствует о существовании невыявленных в ходе априорного технологического анализа корреляционных связей между параметрами тест-элементов. Их влияние, как показывает практика, приводит к ошибочным выводам о нестационарности стационарных технологических процессов и другим характерным ошибкам, о которых упоминалось выше.

При малом количестве длинных реализаций оценку стационарности и случайности удобно выполнять с помощью универсальных непараметрических критериев серий и инверсий [8], для применения которых вполне достаточно даже одной реализации. Разработанный автором вариант алгоритма оценки основан на подведении итогов "голосования" по результатам подсчета инверсий и серий при двух уровнях отсчета, соответствующих математическому ожиданию и медиане. Количество смежных интервалов, на которые делится реализация, задается исследователем.

В ходе практической апробации были обследованы 72 партии тонкопленочных плат. Из партии выбирались две подложки, на каждой из которых на пяти платах контролировались до подгонки сопротивления трех одинаковых по номинальной величине резисторов. Установлено, что $\sigma_{\text{отн}}[\Delta(0 - 1.0)] = 6,5 \%$, $\sigma_{\text{отн}}[\Delta(1.0 - 1.1)] = 3,1 \%$, $\sigma_{\text{отн}}[\Delta(1.1 - 1.1.1)] = 2,9 \%$, $\sigma_{\text{отн}}[\Delta(1.1.1 - Y1)] = 1,9 \%$. Относительная погрешность измерений 0,1 % меньше минимального из перечисленных значений более чем на порядок, поэтому все составляющие дисперсии значимы. Оценка стационарности и случайности проводилась при уровне значимости 5 % и количестве интервалов, равном шести. Результаты обработки (табл. 3.1) дают достаточные основания для принятия гипотез о случайности и стационарности технологического процесса до подгонки.

После подгонки контролировались сопротивления двух резисторов на пяти платах каждой из ста подложек, взятых из разных партий. Импульсно-токовая подгонка с ручной регулировкой параметров импульсов приводит к появлению "эффекта оператора" — доминирующего субъективного случайного фактора, и, как следствие, процесс становится нестационарным. Соответствующие оценки выпол-

нены при количестве интервалов, равном десяти. В обоих случаях процесс удовлетворяет принятому критерию случайности, т. е. дополнительных корреляционных связей не обнаружено. Результаты проверки гипотезы о соответствии закона распределения погрешностей в пределах реализации нормальному по критерию χ^2 -Пирсона при том же уровне значимости косвенно согласуются с результатами оценки стационарности.

Таблица 3.1. Статистическая оценка технологических погрешностей

Оценка	Случайность		Стационарность		Норм. закон	
	За	Против	За	Против	За	Против
До подгонки	30	0	24	6	26	4
После подгонки	10	0	0	10	5	5

Совместное использование факторного анализа и графа технологических погрешностей открывает новые возможности применения контроля точности для диагностики технологических процессов микроэлектроники по результатам операционного контроля параметров тестовых структур, элементов и интегральных схем. Эти возможности обусловлены наглядностью предложенной модели, отражающей поточно-групповую организацию технологических процессов, а также повышенной достоверностью статистических оценок, которая в основном определяется длиной реализации, а не их количеством. Дисперсионный анализ как основа методики контроля точности, очевидно, будет более эффективным для коротких реализаций и больших однородных выборок. В целом указанные подходы не исключают, а дополняют друг друга.

3.3. Статистическая разрешающая способность контроля

В процессе контроля производственных партий ИМС часто возникает необходимость оперативного решения задачи относительной оценки точности процессорных средств контроля (ПСК) и технологической точности изготовления партии ИМС. Эта необходимость связана как с отсутствием эталонов для целого ряда параметров ИМС,

так и с желанием оперативно получить ответ на вопрос: может ли тестер по тому или иному параметру "отличать" плохие микросхемы партии от хороших? Если технологические погрешности изготовления ИМС и погрешности измерений (инструментальные погрешности) являются случайными и некоррелированными величинами, то эта задача может быть сформулирована и решена на базе симметричной схемы действия факторов (3.2), известной из теории парной линейной корреляции (факторного анализа).

Предпосылки для выполнения таких условий существуют. Обязательными атрибутами современных процессорных средств контроля являются программно-аппаратная реализация автокалибровки, компенсация систематической составляющей погрешности измерений, уменьшение влияния случайной составляющей за счет усреднения серии измерений, а также алгоритмические ловушки выбросов (грубых погрешностей измерений).

Влияние контактирующих приспособлений на точность измерений [20] может проявиться в появлении дополнительных систематических и случайных составляющих измерительной погрешности.

Перечисленные особенности вполне позволяют считать результирующую измерительную погрешность контроля случайной или, по крайней мере, выдвинуть такую гипотезу.

Такое предположение, если оно, конечно, справедливо, позволяет, обратившись к факторному анализу и симметричной схеме действия факторов (3.2), предложить модель взаимосвязи массивов результатов основного и повторного контроля партии изделий [11, 12].

Модель предполагает формирование отклонения Δx параметра изделия от среднего значения \bar{x} в виде суммы технологической Δ_T и измерительной Δ_I погрешностей. Если контроль партии изделий объемом n провести дважды, то коэффициент парной линейной корреляции результатов первого контроля x_0 с результатами повторного контроля x_{II} определится соотношением

$$r = \frac{cov(x_0, x_{II})}{\sigma(x_0)\sigma(x_{II})} = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_T^2 + \sigma_I^2}, \quad (3.5)$$

где $cov(x_0, x_{II})$ — ковариация случайных величин x_0 и x_{II} ; σ_T и σ_I —

среднеквадратические отклонения погрешностей изготовления и измерения. Условия, при которых технологические погрешности можно считать случайными, рассмотрены в [11]. Разрешающая способность ПСК, представляющая собой отношение $\sigma_T/\sigma_{И}$, определяется из формулы (3.5) через коэффициент корреляции

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{И}} = \sqrt{\frac{r}{1-r}}. \quad (3.6)$$

Доверительный интервал выборочного значения коэффициента корреляции может быть преобразован в соответствующий интервал для разрешающей способности. Таким образом, не определяя абсолютных значений σ_T и $\sigma_{И}$, можно оценить их отношение, однако положительный эффект этим обстоятельством не ограничивается.

Коэффициент парной линейной корреляции, как известно¹², является частным случаем обобщенного коэффициента корреляции

$$\Gamma = \frac{\sum a_{ij}b_{ij}}{\sqrt{\sum a_{ij}^2 \sum b_{ij}^2}}, \quad (3.7)$$

где a_{ij} — x -оценка, справедливая для каждой пары элементов основного массива результатов контроля и обладающая свойством $a_{ij} = -a_{ji}$; b_{ij} — y -оценка, справедливая для каждой пары элементов массива результатов повторного контроля и обладающая свойством $b_{ij} = -b_{ji}$.

Другим частным случаем обобщенного коэффициента корреляции (3.7) является коэффициент ранговой корреляции Спирмэна, который в случае несвязанных рангов имеет вид:

$$r_S = 1 - \frac{6S(d^2)}{n^3 - n}, \quad (3.8)$$

где $S(d^2)$ — сумма квадратов разностей рангов, определяемая как

$$S(d^2) = \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2,$$

¹²Кендэл М. Ранговые корреляции. Зарубежные статистические исследования. — М.: Статистика, 1975.—216 с.

где $\vec{A}_i = \{ A_i \}$ — первый вектор рангов (массив результатов основного контроля), $\vec{B}_i = \{ B_i \}$ — второй вектор рангов (массив результатов повторного контроля). Поскольку подходы (3.5) и (3.8) взаимосвязаны, то правомерно распространение области применения формулы (3.6) на неизмерительные ПСК, что, в свою очередь, позволяет решать задачи сравнения по эффективности вариантов измерительных и неизмерительных ПСК.

Экспериментальная проверка предположения о случайном характере инструментальной погрешности при наличии массивов результатов основного и повторного контроля партии изделий с помощью измерительного ПСК в виде числовых значений параметров может быть выполнена известными методами [8] для последовательности, образованной разностями значений основного и повторного измерений.

Предложенная характеристика ПСК была успешно использована для решения ряда практических задач контроля элементной базы в условиях производства и при проведении экспериментальных исследований с целью разработки новых ПСК [10].

Раздел 4.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

4.1. Измерения и контроль параметров ИМС

При наличии адаптера и соответствующей программы в библиотеке программ тестера (энергонезависимом запоминающем устройстве) решение задачи контроля ИМС существенно упрощается. Для выполнения этого задания необходимо:

1. Получить у преподавателя лабораторное задание, микросхемы, адаптеры и имена (номера) программ измерений, записанных в библиотеку программ одного из двух тестеров лаборатории. Если номер программы находится в интервале от 1 до 40, то эту программу следует искать на первой странице библиотеки программ. Программы с номерами от 41 до 80 размещены на второй странице библиотеки.

2. Необходимо установить адаптер в гнезда разъема подключения адаптера, расположенного на передней панели тестера. При этом фиксирующий рычаг должен находиться в крайнем правом положении, а первый контактный штырь — в первом гнезде разъема подключения адаптера. После установки необходимо зафиксировать контакт перемещением фиксирующего рычага в крайнее левое положение.

3. Включить питание тестера (см. подразд. 2.4). Самотестирование прибора выполняется автоматически сразу же после включения питания. О результатах самотестирования сообщить преподавателю или лаборанту.

4. Для управления тестером в режиме контроля с помощью имеющихся адаптеров и программ используются следующие клавиши: **PROGR.CALL** – вызов программы, **PROGR.LIBR** – просмотр библиотеки программ, **CHANG UNIT** – смена страницы библиотеки, **Enter** – ввод, а также клавиша **Delete** – стереть, клавиши перемещения курсора **▷**, **◁**, **△**, **▽** и буквенно-цифровые клавиши вместе с клавишей **Shift**.

Программу контроля можно вызвать двумя способами — с по-

мощью клавиши вызова программы (по имени) или в процессе просмотра библиотеки программ (по имени или номеру). В первом случае следует нажать клавишу **PROGR.CALL** и в поле, выделенном указателем, набрать имя программы, нажать **Enter**. Это приведет к загрузке программы в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) в том случае, когда программа с данным идентификатором имеется в энергонезависимом перепрограммируемом запоминающем устройстве (ППЗУ) хранения программ.

Во втором случае, нажав клавишу **PROGR.LIBR**, мы вызовем первую страницу КМОП-ОЗУ программ. Нажатие клавиши **CHANG UNIT** приведет к смене страницы. Далее с помощью клавиш перемещения курсора выбираем нужную нам программу (по номеру или идентификатору) и нажимаем **Enter**. В результате на экране появляется поле с именем выбранной программы. Повторное нажатие загрузит выбранную программу в ОЗУ.

5. После нажатия клавиши **START** запускается выбранная программа измерений и на экран дисплея выводятся результаты контроля ИМС, а именно: обозначение параметра, его предельное значение и размерность, а также измеренное (фактическое) значение. Инверсная строка указывает на несоответствие микросхемы техническим условиям. После появления такой строки тестер может самостоятельно принять решение о прекращении дальнейших измерений. Это может означать, что ИМС либо неисправна, либо неправильно подключена, либо предельное значение параметра назначено неверно. В случае, когда тестер прекращает измерения при очень малом (единицы микроампер) токе потребления и отмечает этот результат инверсной строкой, то тем самым он оповещает нас о том, что контактирование ИМС с тестером не состоялось либо из-за плохого качества контакта, либо из-за неправильного подключения ИМС.

4.2. Программирование тестера TR-9574

При наличии готового адаптера и необходимой справочной информации на микросхему подготовка к измерениям сводится к разработке программы измерений с последующей записью ее в библиоте-

ку программ тестера (энергонезависимое запоминающее устройство). Для выполнения этого задания необходимо:

1. Получить у преподавателя лабораторное задание, микросхему, справочную информацию (или ТУ) на микросхему.

2. Новая программа измерений может быть разработана либо с "нуля", либо путем редактирования аналогичной программы, имеющейся в ППЗУ программ. Для разработки оригинальной программы в начале нажимаем клавишу **SYSTEM SELECT** выбора семейства (типа) аналоговых устройств (операционные усилители, повторители напряжения, компараторы, стабилизаторы напряжения). Индикация режима работы тестера (в данном случае режима **SYSTEM SELECT**) — в верхней части дисплея. С помощью клавиш перемещения курсора вверх и вниз выбираем необходимый тип устройств и нажимаем **Enter**, подтверждая выбор. Следует иметь в виду, что перемещение курсора в этом режиме вызывает стирание в ОЗУ вызванной для редактирования программы.

3. Нажатие клавиши **DEVICE SELECT** позволяет выбрать режим задания количества одноименных аналоговых устройств в одном корпусе. В данный режим тестер выходит также автоматически после выбора типа аналоговых ИМС. Об этом сообщает индикатор режима в верхней части дисплея. В одном корпусе ИМС тестер способен контролировать параметры одного, двух, трех и четырех устройств. С помощью клавиш перемещения курсора вверх и вниз выбираем необходимое количество устройств в одном корпусе и нажимаем **Enter**, подтверждая выбор.

4. После задания количества одноименных устройств в одном корпусе тестер предлагает набрать новый идентификатор измерительной программы. После нажатия **Enter** идентификатор присваивается программе, а тестер предлагает набрать краткий комментарий к имени программы, например сообщить код разработчика (номер учебной группы и порядковый номер по журналу). После нажатия клавиши **Enter** комментарий запоминается, а курсор переходит в нижнюю часть экрана дисплея. При этом пользователю предоставляется возможность сортировки проверяемых ИМС на группы. Группа **BIN 5** зарезервирована для бракованных ИМС, а группа **BIN 1**

является постоянно выбранной. При выборе режима сортировки для каждой группы **BIN 1, BIN 2, BIN 3, BIN 4, BIN 5** необходимо будет задать свои условия измерений **TEST CONDITIONS** и предельные значения **TEST LIMITS**.

5. Для отказа от сортировки ИМС достаточно перейти в режим задания условий измерений **TEST CONDITIONS**, нажав соответствующую клавишу в верхнем ряду клавиатуры. Это действие обновит страницу дисплея. На ней появится таблица задания условий измерений, которую необходимо заполнить.

В этом режиме пользователь имеет возможность определить условия проведения измерений — задать напряжения питания, нагрузку и т. п. Поле вводимого параметра выбирается с помощью клавиш перемещения курсора. В выделенное поле вводятся десятичные цифры и точка, отделяющая целую часть параметра от дробной. При этом единица измерения, указанная в заголовке текущего столбца таблицы, может быть изменена с помощью клавиши **CHANGE UNIT**. Нажатие этой клавиши меняет двоичное состояние поля выбора условий измерения на противоположное. Нажатие клавиши **Enter** приводит к вводу набранного значения условия измерений и переходу на следующее поле.

Тестер "оставляет за собой" право контроля заданных пользователем условий измерений в соответствии с возможностями, описанными в разд. 2.

6. Для задания предельных значений измеряемых параметров ИМС необходимо нажать клавишу **TEST LIMITS**. Это действие приведет к очередной смене страницы дисплея. Заполнение полей предельных значений измеряемых параметров выполняется аналогично заданию условий измерений с помощью цифровых клавиш, десятичной точки и клавиш перемещения курсора.

7. После нажатия клавиши **START** разработанная программа измерений уже запускается и на экран дисплея выводятся результаты контроля ИМС (см. подразд. 4.1). Однако возможности программирования тестера не исчерпаны. Нажатие клавиши **RUN** позволяет, во-первых, выбрать режим однократных или непрерывно повторяющихся измерений. Во-вторых, пользователь может определить,

необходимо ли останавливать процесс измерения непосредственно после определения брака по текущему параметру или выполнить оставшиеся измерения. В-третьих, менять вид индикации при контроле нескольких аналоговых устройств в одном корпусе ИМС. В-четвертых, можно блокировать клавиатуру, задав двузначный пароль.

8. Дополнительные две возможности открывает нажатие клавиши **SPEC.RUN**. Первая возможность предполагает выбор одной группы сортировки из предлагаемых трех классов **BINNIG MODE**. Вторая возможность позволяет пользователю изменять времена задержек, прибавляя их к базовым значениям, которые от пользователя не зависят.

9. Нажатие клавиши **OUTPUT/INPUT** открывает доступ в режим выбора подключаемых внешних устройств к тестеру.

В первом секторе поля экрана можно указать, какой из четырех интерфейсных разъемов, установленных на задней панели тестера, будет находиться в активном состоянии, то есть через какой разъем будет происходить передача информации на внешние устройства. Если выбран обмен через канал общего пользования (КОП), то появляется дополнительное подменю:

TEST RESULTS (IN TADS) – выдача результатов измерений;

ton (TEST RESULTS) – выдача результатов измерений по инициативе оператора. Данный режим рекомендуется только при работе со строкопечатающим устройством;

CMOS MEMORY OUT (IN TADS) – сохранение содержимого ППЗУ программ. Инициализацию этого режима выполняет внешний контроллер канала общего пользования (КОП);

CMOS MEMORY IN (IN LADS) – загрузка информации в ППЗУ измерительных программ.

Во втором секторе определяются формат и способ выдачи результатов измерения. Выбранный здесь формат действителен при выдаче результатов по всем каналам.

В третьем секторе задаются правила работы с автоматическим загрузчиком ИМС. Поскольку он не входит в лабораторный комплект, то описания соответствующих возможностей опускаем.

10. На этом разработка (редактирование) измерительной программы заканчивается. Ее можно сохранить в энергонезависимом ППЗУ программ. Для этого необходимо нажать клавишу **PROGR.RECORD**. При этом имеется возможность ввести новый идентификатор программы в поле, обозначенное курсором. После ввода идентификатора нажать **Enter** для записи программы в библиотеку программ. Программа при этом автоматически получит соответствующий номер. После записи, нажав **PROGR.LIBRARY**, можно будет увидеть номер только что записанной программы — он высвечивается инверсно.

4.3. Исследование влияния условий измерений

Под условиями измерений прежде всего имеются в виду напряжения питания. Для некоторых типов аналоговых ИМС, например операционных усилителей, в технических условиях (ТУ) основные параметры нормируются при нескольких значениях напряжения питания. Возможность измерения параметров ИМС при уменьшении напряжения питания по сравнению с номинальными значениями лежит в основе метода критических питающих напряжений [1, 14].

Критическим называется такое напряжения питания, при котором либо параметр (параметры) выходят за установленные в ТУ пределы, либо микросхема перестает функционировать. Метод критических питающих напряжений является достаточно информативным способом индивидуального контроля качества ИМС. Результаты теоретических и экспериментальных исследований [1, 14] свидетельствуют о том, что микросхемы, сохраняющие работоспособность при минимальном напряжении питания, являются более надежными.

Кроме напряжений питания можно менять в разрешенных ТУ пределах другие электрические параметры: сопротивления нагрузки, замыкать и размыкать петлю обратной связи и т. п. Условия измерений зависят также от температуры внешней среды, цикличности изменения температуры в процессе измерений (термоциклирования) или перед измерениями (электротермотренировки), относительной влажности, давления и других факторов.

Для выполнения лабораторного задания студенту необходимо:

1. Получить у преподавателя лабораторное задание, микросхему, адаптер и имя (номер) программы измерений, записанной в библиотеку программ одного из двух тестеров лаборатории. Если номер программы находится в интервале от 1 до 40, то эту программу следует искать на первой странице библиотеки программ. Программы с номерами от 41 до 80 размещены на второй странице библиотеки.

В лабораторном задании алгоритм изменения условий измерений либо однозначно определяется преподавателем, либо разрабатывается студентом по заданию преподавателя, например, при изучении метода критических питающих напряжений.

2. Установить адаптер, подключить его к тестеру и закрепить микросхему в контактном приспособлении адаптера.

3. Включить тестер и загрузить (вызвать) программу измерений. Нажав последовательно клавиши **SYSTEM SELECT, DEVICE SELECT, TEST CONDITIONS, TEST LIMITS**, убедиться в том, что загруженная программа не содержит ошибок.

4. Нажатием клавиши **START** измерить параметры ИМС и передать их в персональный компьютер для накопления и дальнейшей обработки.

5. Нажав клавишу **TEST CONDITIONS**, войти в режим задания условий измерений и изменить условия измерений в соответствии с лабораторным заданием.

6. Повторить измерения параметров ИМС и передать их в персональный компьютер для накопления и дальнейшей обработки.

7. Предыдущие два пункта повторить в цикле в соответствии с лабораторным заданием.

8. Обработать данные, накопленные компьютером, и подготовить отчет по лабораторной работе. Для обработки результатов измерений данные, накопленные компьютером, могут быть скопированы на дискету или переданы по локальной сети в выделенную студенту область памяти на одном из серверов университета (кафедры). Для обработки данных могут быть использованы универсальные программные продукты или специализированные программные средства лаборатории 328-3.

4.4. Разработка адаптера для контроля аналоговой ИМС

Проектирование адаптера предполагает разработку схемы электрической принципиальной и реализацию ее на базе одной из заготовок адаптера, прилагаемых к тестеру. Лабораторные задания содержат различные варианты — от разработки схемы электрической принципиальной и перечня элементов до изготовления и наладки адаптера. При разработке схемы студенту могут быть предложены файлы с описаниями заготовок адаптеров в САД-системах типа P-CAD, а также примеры исполнения схем электрических принципиальных для адаптеров аналогичных микросхем.

Связь между адаптером ИМС и тестером осуществляется через два ряда контактов P1 и P2 коммутационной платы тестера по 32 контакта в каждом ряду. Нумерация контактов начинается от ближнего контакта к пользователю, сидящему перед дисплеем. Слева соединитель P1, а справа — P2.

В прил. 1 к руководству по эксплуатации тестера плата коммутации именуется платой семейства ИП. В этом приложении приведены фотографии прилагаемых к тестеру готовых адаптеров и схемы электрические принципиальные их подключения к плате коммутации, а также фрагмент схемы электрической принципиальной платы коммутации, "обрамляющий" контакты соединителей P1 и P2 (рис. 1, а прил. 1). Будем в дальнейшем именовать этот фрагмент базовой схемой подключения адаптера (БСПА).

Для разработки схемы электрической принципиальной адаптера рекомендуется использовать прозрачную кальку, накладывая ее на принципиальную схему БСПА. Этот прием позволяет видеть, куда будут подключаться контакты адаптера. На рис. 4.1, 4.2 представлены схемы электрические принципиальные некоторых типовых адаптеров, входящих в комплект поставки тестера TR-9574. Поскольку схемы скопированы непосредственно из документации фирмы EMG, то они не вполне соответствуют требованиям российской нормативно-технической документации.

Для выполнения лабораторного задания необходимо:

1. Получить у преподавателя лабораторное задание, микросхему,

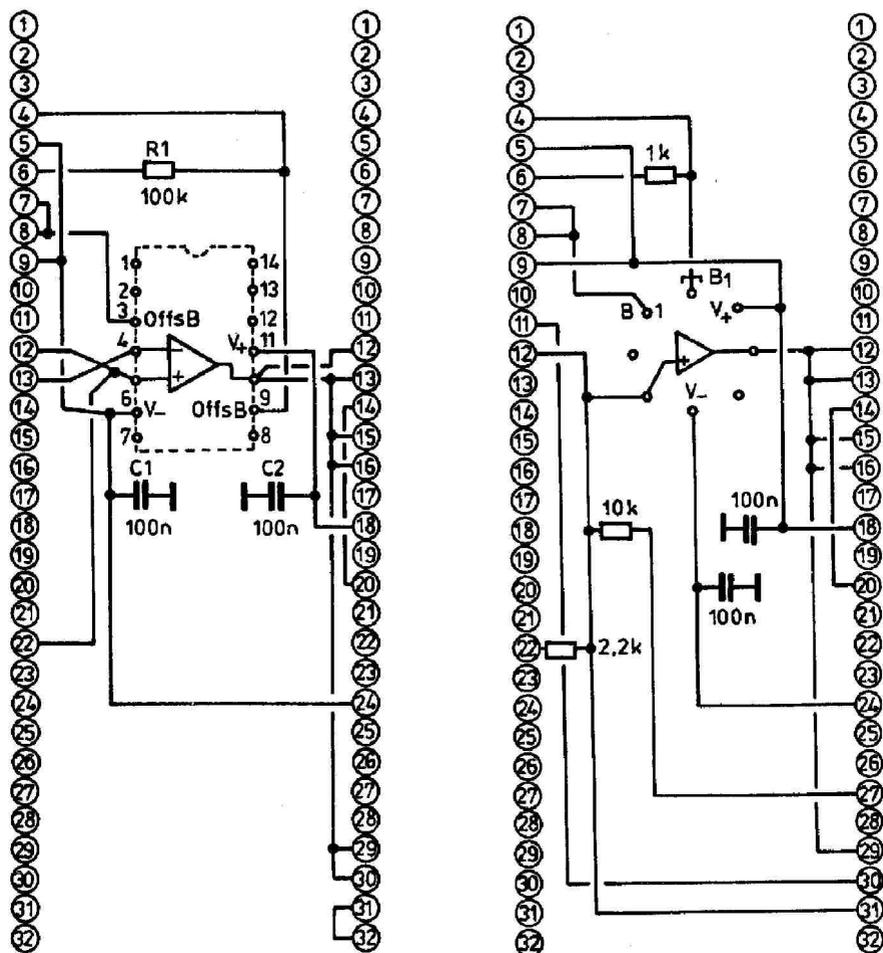


Рис. 4.1. Схемы адаптеров для операционного усилителя μA 741 (слева) и повторителя напряжения LM 310 (справа)

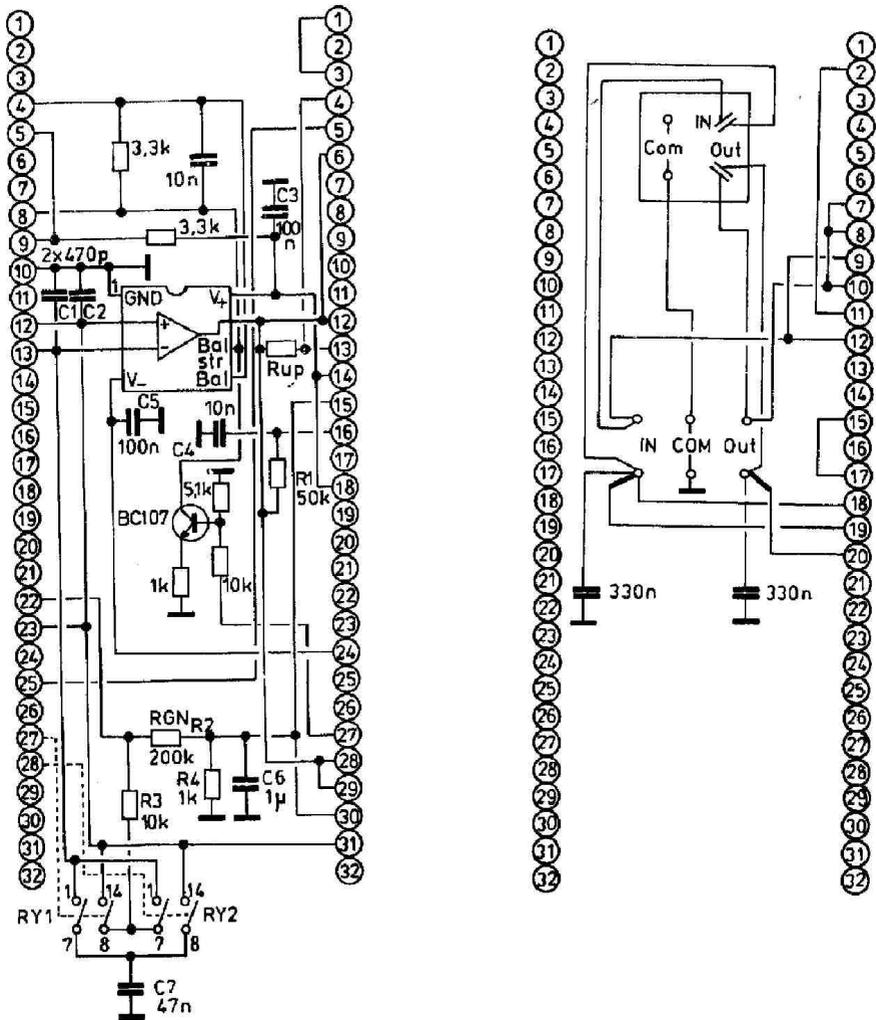


Рис. 4.2. Схемы адаптеров для компаратора напряжения *LM 311* (слева) и регулятора напряжения *VR 78* (справа)

заготовку адаптера и документацию на тестер и микросхему, необходимую для разработки адаптера. В лабораторном задании могут содержаться указания по дополнительному информационному поиску, например, адреса в INTERNET сайтов фирм-изготовителей.

2. Разработать схему электрическую принципиальную адаптера и согласовать ее с преподавателем.

3. Укомплектовать адаптер элементной базой в соответствии с перечнем элементов.

4. Смонтировать плату адаптера, используя заготовку и комплектующие изделия согласно схеме электрической принципиальной. Примеры перехода от схемы электрической принципиальной к схеме соединений на плате заготовки адаптера приведены в приложении 1 к руководству по эксплуатации прибора TR-9574.

5. Разработать программу измерений (см. лабораторное задание 4.2) и записать ее в память программ.

6. Проверить работу программы и адаптера после установки ИМС в адаптер и подключения адаптера к плате коммутации (см. лабораторное задание 4.1).

7. При необходимости может потребоваться проверка и отладка адаптера, включающие контроль параметров ИМС по постоянному току и измерение параметров и формы измерительных сигналов с помощью универсальных измерительных приборов и осциллографа.

8. В отчете по лабораторной работе привести разработанную документацию на адаптер и результаты его проверки совместно с микросхемой.

4.5. Согласование требований российских и зарубежных нормативных документов по контролю ИМС

Выполнение данного лабораторного задания позволит приобрести практические навыки решения таких задач, как обоснование возможности использования импортного или нестандартного оборудования для контроля отечественных и импортных ИМС. Для выполнения задания необходимо:

1. Получить у преподавателя номер или обозначение параметра (параметров) аналоговой ИМС и необходимые нормативные или справочные документы (ГОСТы, ТУ, спецификации, руководство по эксплуатации тестера или другие документы). Обозначение может соответствовать либо техническому описанию тестера TR-9574 (см. разд. 2), либо международному обозначению параметра, приведенному в технических условиях (спецификации) на импортные ИМС. Спецификации можно также взять с серверов фирм-изготовителей ИМС.

2. Изучить и зарисовать блок-схему и методику измерения параметра, реализованную в тестере TR-9574.

3. Сравнить с блок-схемами и методиками ГОСТ 19799-74 и определить аналог (аналоги). Дополнительно может быть поставлена задача сравнения с ТУ на ИМС.

4. Дать заключение о возможности (или невозможности) включения заданного параметра в состав используемых на входном контроле. Предложить перечень мероприятий по согласованию требований различных нормативных документов.

4.6. Изучение "портрета" поставщика ИМС

Статистический "портрет" поставщика (изготовителя) ИМС в простейшем случае может быть оперативно получен с помощью тестера без использования компьютера. Для этого необходимо определить параметр ИМС, по которому формируются группы сортировки, и воспользоваться клавишей **BINS**. Предельные значения параметров ИМС, вводимые по команде **TEST LIMITS**, образуют группу сортировки с обозначением **BIN 1**. Нажав клавишу **BINS**, можно создать и другие группы сортировки по выбранному параметру с порядковыми номерами **BIN 2,3,4**.

После набора порядкового номера группы сортировки надо нажать клавишу **ENTER**. Тестер предоставит возможность пользователю ввести предельные значения параметров, относящиеся к соответствующей группе сортировки.

В выделенное курсором поле кадра **BIN LIMITS** вводится порядковый номер группы сортировок по предельным значениям выбранного (заданного) параметра. Этот ввод контролирует операционная система, поэтому в поле, выделенном курсором, изменения происходят только после ввода цифр 2, 3 или 4.

Для перезаписи предельных значений параметров в другую группу необходимо нажать клавишу **CHANGE UNIT**. Появившийся на экране кадр **TEST LIMITS** подтверждает выполнение операции задания предельных значений для заданной группы сортировки.

Для использования методик получения "статистических портретов", изложенных в подразд. 3.2, необходим компьютер для накопления и обработки результатов измерений, а также программно-аппаратные средства сопряжения тестера с персональным компьютером. Как правило, для работы с тестером используется относительно маломощный компьютер, основное назначение которого — зафиксировать результаты измерений. Поэтому для качественной обработки целесообразно перенести информацию на более мощный компьютер.

Для выполнения лабораторного задания необходимо:

1. Получить у преподавателя лабораторное задание, микросхемы, адаптер и имена (номера) программ измерений, записанных в библиотеку программ одного из двух тестеров лаборатории.

2. В зависимости от лабораторного задания определить, каким образом получить статистический "портрет" поставщика ИМС.

3. Если "портрет" поставщика необходимо получить без использования компьютера, то следует воспользоваться рекомендациями, изложенными выше. При использовании компьютера в качестве накопителя результатов измерений и средства генерации статистического "портрета" поставщика можно воспользоваться рекомендациями, изложенными в лабораторном задании 4.1.

4. Для подготовки отчета можно использовать такие универсальные программные средства, как Statistika, MathCad, MathLab, LabView.

Результаты сортировки партии микросхем, полученные с помощью команды **BINS** тестера, для подготовки отчета также могут быть переданы на компьютер.

4.7. Определение разрешающей способности контроля

При выполнении лабораторной работы тестер TR-9574 должен быть подключен к персональному компьютеру с помощью программно-аппаратных средств, описанных в разд. 2. Эти средства позволяют накапливать и сохранять результаты измерений с помощью персонального компьютера. Оценка разрешающей способности по случайным составляющим погрешности измерений (см. подразд. 3.3) является одним из видов смыслового (семантического) сжатия результатов контроля (см. разд. 3).

Для выполнения лабораторного задания необходимо:

1. Получить у преподавателя или лаборанта партию микросхем, адаптер и имя (номер) программы измерений, записанной в библиотеку программ тестера. На персональном компьютере, подключенном к тестеру, запустить программу накопления результатов измерений.

2. В соответствии с подразд. 4.1 измерить параметры микросхемы и передать их значения для дальнейшей обработки в компьютер.

3. Повторить измерения параметров микросхемы и передать для дальнейшей обработки в компьютер. Эта информация составит массив повторных измерений, необходимый для оценки статистической разрешающей способности измерителя без учета влияния нестабильности контактного сопротивления входного разъема адаптера.

4. Повторить измерения для всех микросхем партии с передачей результатов контроля в компьютер. В результате получим массив повторных измерений, который уже позволит оценить разрешающую способность тестера с учетом влияния нестабильности контактного сопротивления входного разъема адаптера.

5. Обработать результаты основного и повторных измерений для заданных параметров с целью определения статистической разрешающей способности с учетом и без учета нестабильности контактного сопротивления входного разъема адаптера.

ПРИМЕЧАНИЕ. Очистка контактов или замена входного разъема может отразиться на разрешающей способности контроля. Для того чтобы экспериментально убедиться в этом, необходимо выполнить повторную серию измерений после очистки контактов.

4.8. Оформление отчетов

1. Отчет должен содержать титульный лист с названием лабораторной работы и с указанием исполнителей и руководителя (преподавателя). Этот лист должен соответствовать типовой форме, определенной стандартом университета.

2. В отчете необходимо подробно сформулировать лабораторное задание, привести таблицы с экспериментальными результатами. Рекомендуемые формы таблиц не являются обязательными. Для большей наглядности наряду с табличной формой представления результатов целесообразно использовать графическое отображение.

3. Обязательным разделом отчета являются "Выводы". В этом разделе подробно излагаются систематизированные итоги анализа экспериментальных результатов на предмет их соответствия теоретическим представлениям¹. При этом рекомендуется избегать "обтекаемых" общих фраз, не имеющих непосредственного отношения к полученным экспериментальным результатам. Защита лабораторной работы часто сводится к детальному устному или письменному обоснованию того или иного вывода со ссылками на конкретные строки или столбцы таблиц отчета.

В заключение необходимо сформулировать свои предложения по совершенствованию контроля ИМС с помощью тестера TR-9574.

ПРИМЕЧАНИЕ. Допускается безбумажное оформление отчета по лабораторной работе с помощью издательских систем WORD, TEX и специального программного обеспечения лаборатории 328-3 (SSPO328). Краткое описание этих программных средств приведено в файле *SSPO328.txt* корневого каталога диска *C*. Этот файл можно просмотреть в менеджере программ NC (Norton Commander) или VC (Volkov Commander), нажав клавишу F3.

¹Некоторые студенты почему-то ошибочно считают соответствие эксперимента теории обязательным условием успешной защиты лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Какие интегральные микросхемы называются аналоговыми?
2. Чем отличается параметрический контроль аналоговых ИМС от контроля логических (цифровых) ИМС?
3. Какова область применения ГОСТ 19799-74?
4. Каким образом построена классификация стандартных методов контроля аналоговых интегральных микросхем?
5. Какие задачи решает входной контроль ИМС?
6. Как определить необходимый объем входного контроля ИМС?
7. Что является основанием для увеличения или уменьшения объема входного контроля ИМС?
8. Что является основанием для введения или отмены входного контроля?
9. Какие схемы взаимодействия поставщика и потребителя ИМС вам известны?
10. Каким образом схема взаимодействия поставщика и потребителя связана с качеством ИМС?
11. Каковы особенности входного контроля импортных ИМС?
12. Каковы особенности использования импортных тестеров для контроля ИМС отечественного производства?
13. В чем заключается так называемая проблема неопределенности при использовании статистических методов?
14. Что такое случайность последовательности результатов измерений?
15. Что такое стационарность последовательности результатов измерений?
16. Зачем необходима оценка случайности числовой последовательности результатов измерений параметров ИМС?
17. Зачем необходима оценка стационарности числовой последовательности результатов измерений параметров ИМС?
18. Как выбрать минимально необходимый объем выборки, который позволил бы судить о свойствах генеральной совокупности (партии) изделий?

19. Как назначить доверительную вероятность (уровень значимости) при проверке статистических гипотез?

20. Какую помощь могут оказать государственные и отраслевые стандарты при назначении доверительной вероятности?

21. Как получить статистический "портрет" изготовителя (поставщика) ИМС? Какие варианты статистических "портретов" вам известны?

22. Какую полезную в смысле обеспечения качества продукции информацию можно извлечь из статистических "портретов" поставщика ИМС?

23. В чем различия одномерных и многомерных статистических "портретов" поставщика ИМС?

24. Какие системы российских стандартов регламентируют применение методов математической статистики для обработки результатов контроля ИМС?

25. Как оценить статистическую разрешающую способность средства контроля?

26. При каких условиях возможна оценка статистической разрешающей способности измерителя параметров ИМС?

27. Какова последовательность действий при разработке адаптера для ИМС?

28. В чем состоит сущность метода критических питающих напряжений?

29. Можно ли с помощью тестера TR-9574 проводить дистанционные измерения параметров аналоговых электронных средств, например ИМС, находящихся в термостате?

Заключение

Выполнение заданий лабораторного практикума отнюдь не означает, что будут получены ответы на все вопросы, касающиеся организации и проведения автоматизированного контроля аналоговых интегральных микросхем. Внимательные читатели наверняка обратили внимание, например, на отсутствие в тексте отечественных аналогов обозначений некоторых параметров, которые может контролировать тестер TR-9574. На занятиях в лаборатории у студентов есть возможность поработать с документацией фирмы EMG, отечественными стандартами и техническими условиями, для того чтобы получить представление о сложностях интеграции отечественной электронной промышленности в мировое производство электронных средств.

Автоматизированный тестер TR-9574 является достаточно современным измерительным прибором. На его базе наряду с лабораторными заданиями, описанными выше, в лаборатории 328-3 кафедры КТ РЭС выполняются различные учебные исследования (УИРС), в том числе по заказам промышленных предприятий. Более подробно о тематике научных исследований и конструкторско-технологических разработок в области обеспечения качества электронных средств можно узнать на сайте проекта Ф0047 федеральной целевой программы "Интеграция" по адресу www.dlts.vpti.vladimir.ru в разделе "Внебюджетная поддержка проекта".

Для аппаратной поддержки 16-разрядного программируемого параллельного интерфейса могут быть использованы также другие платы (карты) персональных компьютеров, имеющиеся в продаже и работающие с компьютерными шинами ISA или PCI. Одну из таких плат, рассчитанную на работу с шиной ISA, может изготовить ОАО «Владимирский завод "Электроприбор"» совместно с кафедрой КТ РЭС ВлГУ.

Заказы на изготовление интерфейсных карт и запросы на получение конструкторско-технологической и программной документации по описанным выше разработкам направлять на E-mail: upk@ktrs.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аладинский В.К., Гаврилов В.Ю., Горелкина Е.Н.** Критическое питающее напряжение как информативный параметр при электрофизическом диагностировании КМОП ИС // Электронная техника. Сер. 2. — 1990. — Вып. 4 (207). — С. 87 — 90.
2. **Глудкин О.П., Черняев В.Н.** Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА: Учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1983. — 296 с.
3. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 28 с.
4. ГОСТ 17021–75. Микросхемы интегральные. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 10 с.
5. ГОСТ 19480–74. Микросхемы интегральные. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 22 с.
6. ГОСТ 19799–74. Микросхемы интегральные аналоговые. Методы измерения электрических параметров и определения характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 72 с.
7. ГОСТ 24297–87. Входной контроль продукции. Основные положения. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 9 с.
8. **Жовинский А.Н., Жовинский В.Н.** Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. — М.: Энергия, 1979. — 112 с.
9. Измерения и контроль в микроэлектронике / Под ред. А.А. Сазонова. — М.: Высш. шк., 1984. — 367 с.
10. **Крылов В.П.** Методы и средства параметрического контроля интегральных микросхем: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 1998. — 52 с.
11. **Крылов В.П.** Применение теории точности для диагностики технологических процессов микроэлектроники // Изв. высш. учеб. заведений "Радиоэлектроника". — Киев, 1988. — № 7. — С. 43 — 47.
12. **Крылов В.П.** Определение разрешающей способности процессорных средств входного контроля элементной базы техники связи // Техника средств связи. — 1992. — Вып. 4. — С. 139 — 143.
13. **Поздняков А.Д.** Автоматизация радиоизмерений: Учеб. пособие / ВлГТУ. — Владимир, 1995. — 183 с.

14. **Покровский Ф.Н., Номоконова Н.Н.** КМОП интегральные схемы: формирование и оценка качества: Моногр. / Под общ. ред. В.Ю. Гаврилова. — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1996. — 56 с.
15. **Сретенский В.Н.** Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1988. — 144 с.
16. **Сыпчук П.П., Талалай А.М.** Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. — М.: Сов. радио, 1979. — 168 с.
17. Технология и автоматизация производства РЭС: Метод. указания к лаб. работам 1 – 9 / Владим. политехн. ин-т; Сост.: А.Н. Крутихин, В.П. Крылов, Т.Н. Фролова.— Владимир, 1993. — 100 с.
18. Управление качеством электронных средств: Учеб. для вузов / О.П. Глудкин, А.И. Гуров, А.И. Коробов и др.; Под ред. О.П. Глудкина.— М.: Высш. шк., 1994. — 414 с.
19. **Чернышев А.А.** Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.
20. **Шабанов А.А., Хамидуллин Р.Р.** Контактные устройства для контроля изделий микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1985. — 128 с.

Учебное издание

КРЫЛОВ ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ
АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Лабораторный практикум

Редактор И.А. Арефьева

Корректор В.В. Гурова

Компьютерный набор и верстка В.П. Крылов

Дизайн обложки И.К. Сухарев

ЛР № 020275. Подписано в печать 01.04.03.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,22. Тираж 50 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.