

Р.ЛОНГБОТТОМ • Надежность
вычислительных систем

Р.ЛОНГБОТТОМ

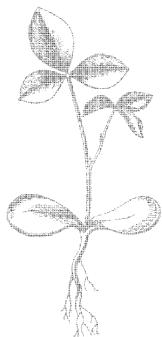
Надежность вычислительных систем

Энергоатомиздат

Р. ЛОНГБОТТОМ

Надежность вычислительных систем

Перевод с английского
под редакцией
П.П. ПАРХОМЕНКО



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1985

ББК 32.972

Л76

УДК 681.31—192

Roy Longbottom

Computer System Reliability.

John Wiley & Sons Chichester, 1980

Р е ц е н з е н т В. К. Левин

Л — $\frac{2405000000 \cdot 301}{051(01) \cdot 85}$ 277-84

© 1980 by John Wiley & Sons, Ltd

© Перевод на русский язык, Энергоатомиздат, 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Вычислительные машины и системы относятся к числу весьма сложных объектов техники, для которых вопросы обеспечения и поддержания их надежности являются предметом непрекращающих забот разработчиков, изготовителей, эксплуатационников и пользователей. Традиционные методы определения надежностных характеристик, базирующиеся на паспортных значениях интенсивностей отказов электронных и других компонентов вычислительных машин и систем, не дают согласующихся с практикой результатов. Аппаратурная и программная сложность, широкое многообразие факторов, оказывающих влияние на процессы проектирования, изготовления и применения вычислительных машин и систем, требуют нового, по-настоящему системного подхода к оценке их надежности. Именно такой подход рассмотрен в книге Роя Лонгботтома – известного английского специалиста и консультанта в области оценки надежности, организации технического обслуживания и приемочных испытаний вычислительных машин и систем.

В книге рассмотрены практические аспекты безотказности, готовности, обслуживаемости и ремонтопригодности различных объектов вычислительной техники – от малых, мини-ЭВМ до больших систем базовых конфигураций, включая их периферийное оборудование, системы связи и программное обеспечение. Охвачены все этапы жизненного цикла вычислительных систем – проектирование, изготовление и эксплуатация, учтены разные точки зрения изготовителя и пользователя относительно понятия интенсивности отказов, рассмотрены вопросы изменения безотказности во времени, зависимости между качеством проектирования и полнотой выходного контроля при изготовлении, влияния окружающей среды на безотказность и др. Значительное внимание уделено практическим методам оценки фактических показателей надежности и методам предсказания их значений.

В процессе перевода текста книги и его редактирования возникали определенные трудности, связанные с отсутствием однозначного соответствия между рядом русских и англий-

ских терминов и определений в области надежности. В связи с этим переводчики и редактор просят читателей не судить их строго за допущенные неточности, касающиеся терминологии, и будут благодарны за замечания и критику.

Главы 1–6 переведены канд. техн. наук М. Ф. Караваем, гл. 7–12 – инж. А. С. Бернштейном.

В заключение хотелось бы выразить уверенность, что книга окажется полезной всем тем, кого интересует проектирование, изготовление, обслуживание и использование вычислительной техники.

П. П. Пархоменко

ВВЕДЕНИЕ

Эта книга написана с целью объяснить сложные вопросы оценки надежности вычислительных систем. В основе ее лежит 18-летний опыт автора по анализу статистических данных по надежности, оценке надежности новых вычислительных систем, приспособленности систем к обслуживанию, классификации приемочных испытаний и наблюдениям за ними, сравнительному анализу проектов различных вычислительных систем – от небольших мини-ЭВМ до самых больших коммерческих систем.

В книге предпринята попытка объяснить и нормализовать все практически важные аспекты надежности, готовности, обслуживаемости и ремонтопригодности и собрана информация для тех, кто интересуется проектированием, производством, обслуживанием и применением ЭВМ. Кроме того, без претензий на полноту изложения, указаны области, требующие дальнейших исследований. Возможно, это позволит лучше понять, что же делает систему надежной.

Книга начинается с разбора ошибочных интерпретаций стандартного надежностного термина "наработка на отказ" и объяснения, почему безотказность, ожидаемая пользователем, почти наверняка не совпадает с предсказанный производителем, хотя для подсчета безотказности применяются общепринятые стандартные методы. В следующей главе показано изменение безотказности во времени, в особенности подчеркнуты отличия теоретической кривой, характеризующей безотказность изделия и кривой его старения в условиях, когда время "выживания" дефектов может достигать 10 000 ч, а старение изделия зависит главным образом от наличия запасных частей (резерва) и обслуживающего персонала.

В гл. 3 рассматриваются вопросы проектирования и управления качеством. В ней показано, что управление качеством должно быть согласовано с этапами проектирования, что недостаточная проработка вопросов проектирования потребует значительно больших затрат на достижение приемлемого уровня надежности. В этой же главе показано, что в зависимости от условий применения безотказность электронных изделий может меняться в значительных пределах, а рассмотрение ряда ЭВМ одинакового быстродействия показывает, что наивысшей безотказности могут достичь ЭВМ, использующие самое большое число компонентов. Приводятся подробные данные о вероятной частоте внесения изменений в процесс проектирования, о диапазоне действия современных методов управления качеством и гарантии качества.

В следующей главе рассмотрено влияние окружающей среды и обсуждается воздействие на надежность температуры, относительной влажности, пыли и сетевого питания. Для большинства типов оборудования приводятся заводские спецификации с указанием диапазонов изменения

факторов внешней среды. Обсуждается необходимость применения кондиционеров, особенно в связи с мини-машинами, показано, что безотказность зависит от рассеивания тепла значительно больше, чем можно было бы предполагать.

Глава 5 посвящена изучению надежности программного обеспечения с указанием различий и сходства с надежностью аппаратуры. Приводятся иллюстрации надежностных характеристик программного обеспечения и выделяются программные ошибки, вызывающие общий отказ системы. В гл. 6 приведены признаки неисправностей аппаратуры и программных ошибок так, как их видит пользователь, и дается ответ на вопрос: как же часто возникают в ЭВМ необнаруженные ошибки?

В гл. 7 дается подробный анализ характеристик времени простое и различные интерпретации второго важнейшего термина теории надежности – среднего времени восстановления, показано, что системы с высоким качеством обслуживания могут иметь самые большие значения средних времен простоя.

В следующей главе приводятся различные методы измерения обслуживаемости системы и ее готовности, т. е. доли времени работы от общего времени жизни системы. Показано влияние изменения характеристик распределения времени простоя и безотказности систем на сравнительно коротких отрезках времени, что неоценимо для учета накопленного опыта эксплуатации.

В гл. 9 рассмотрены особенности таких характеристик системы, как ремонтопригодность и отказоустойчивость, анализируются различные виды испытательных программ, методы конструирования, требования к запасным частям, возможности обнаружения, исправления и автоматической регистрации ошибок. Здесь отмечается, что ресурсы, затрачиваемые для обеспечения поиска неисправностей и более наглядного представления диагностической информации, возможно, следовало бы больше ориентировать на восстановление сбоев и перемежающихся неисправностей. Приводятся методы измерения ремонтопригодности и отказоустойчивости с учетом влияния на работу пользователя надежностных характеристик, определенных на достаточно коротких периодах времени, и требований к инженерному обслуживанию.

В гл. 10 дается подробная оценка приемочных испытаний вычислительных систем и указаны трудности экспериментального измерения безотказности. Обсуждаются достоинства и недостатки различных видов приемочных испытаний, включая стандартные процедуры, которые уже применялись более чем в 1500 испытаниях.

Последние две главы содержат практические методы предсказания безотказности, обслуживаемости (или готовности) базовых конфигураций систем процессоров, мини-ЭВМ, микропроцессоров, подсистем связи, периферийных устройств, программного обеспечения и других систем с учетом многих переменных, введенных в различных главах книги. Все примеры основаны на реальных статистических данных по надежности, полученных из практики с помощью предложенных методов.

В приложениях приведены детали ряда программ, которые могут служить основой эффективных приемочных испытаний вычислительных

систем. Даны также простая программа для программируемого калькулятора, реализующая метод предсказания обслуживаемости, приведенный в гл. 12. Наконец, в разных главах книги даны зависимости безотказности от быстродействия процессоров, а в последнем приложении приведены средства оценки быстродействия, когда оно неизвестно.

Из-за обширности материала маловероятно, что многие станут подробно изучать каждую главу. Пользователь машины или консультант может изучать главы, затрагивающие вопросы аппаратурных неисправностей и программных ошибок, признаков неисправностей, оценки готовности, приемочных испытаний и практических аспектов предсказания надежности. Инженер, проектирующий или обслуживающий ЭВМ, может интересоваться главами, затрагивающими вопросы качества проектирования, влияния окружающей среды, характеристик ремонтопригодности и времени простоев.

Автор выражает искреннюю признательность многим своим коллегам из Центрального агентства по вычислительной технике за помощь в получении информации, использованной в этой книге, и особенно Я. Томсону за его работу по обслуживанию вычислительных систем и Т. Джонсу за его советы по вопросам влияния окружающей среды. Я также благодарен тем поставщикам ЭВМ, которые выносили на широкое обсуждение надежность и обслуживаемость их систем и снабжали детальными статистическими сведениями по надежности ЭВМ в условиях эксплуатации.

Глава 1

ОТКАЗЫ

ВВЕДЕНИЕ

Со времени изобретения первых ЭВМ надежность была одним из важнейших вопросов, занимавших умы их создателей, и поэтому, спустя годы, с появлением новых технологий можно было бы ожидать, что пользователю уже незачем беспокоиться о надежности его ЭВМ. На самом же деле многие потребители сталкиваются с недостаточной надежностью их систем и понимают, что производитель ЭВМ ввел их в заблуждение своими заявлениями о высокой безотказности и готовности системы. Некоторые причины ненадежности довольно очевидны — это большая сложность и размер систем, но необходимо отметить, что само понятие надежности может трактоваться по-разному. В первую очередь следует отметить неправильное понимание термина "отказ".

ГРАФИК ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

Из курса надежности известно, что график безотказности имеет вид вогнутой кривой, представленной на рис. 1.1 и показывающей изменение интенсивности отказов со временем. Начальный участок с высокой интен-



Рис. 1.1. График интенсивности отказов

сивностью отказов известен в электронике как период "выжигания" дефектов или приработки в механических системах, он вызван дефектами производства и сборки. За ним следует период постоянной интенсивности отказов в течение времени полезной работы и, наконец, период старения с резким ростом интенсивности отказов.

Такой характер изменения интенсивности отказов нельзя применить в полной мере ко всему оборудованию ЭВМ. Обычно в течение нескольких лет период постоянной интенсивности отказов еще не достигается. Причина этого — в ошибках проектирования и неожиданно долгом периоде "выжигания". После периода "выжигания" безотказность может быть весьма далека от постоянного значения, последнее обусловлено разнообразием сфер применения и разными внешними воздействиями. Поскольку требуемое время жизни вычислительных систем на базе универсальных ЭВМ составляет от 5 до 10 лет, то обычно период старения в таких системах не наступает.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Процессорные модули

Когда ЭВМ впервые спроектирована, изготавитель обычно подсчитывает окончательное установившееся значение интенсивности отказов сменных модулей, блоков и всей системы, используя эти результаты для выделения "узких" мест в системе, подлежащих первоочередному улучшению, или для перераспределения ресурсов (в целях сбалансированности системы по надежности). В табл. 1.1 приведен пример расчета интенсивности отказов для типичной мини-ЭВМ. В этих расчетах фигурируют числа компонентов в каждом устройстве и интенсивность отказов компонентов, где учитываются такие факторы, как окружающая температура, напряжение и потребляемая мощность. Могут быть приняты во внимание и другие факторы в соответствии с теми условиями, в которых будет работать оборудование. Можно выполнить и более точные расчеты, основанные на индивидуальном подходе к каждому компоненту с учетом числа транзисторов в нем, а не на общем числе компонентов в модуле. Такой подход приведен в справочнике MIL Handbook 217B.

Данные табл. 1.1 отображают один важный момент, что не все дефекты ведут к отказу системы. Например, большинство возможных дефектов пульта управления связано с отказом индикационных ламп, однако маловероятно, что эти отказы вызовут останов процессора.

Процессор

Интенсивность отказов всего процессора получается суммированием интенсивностей отказов отдельных его модулей, как показано в табл. 1.2

Таблица 1.1. Ожидаемая интенсивность отказов мини-ЭВМ (число отказов на 1 млн. ч)

Компонент	Интенсив- ность от- казов компо- нента	Центральный процессор	ЗУ на магнитных сре- дниках емкостью 4 Кслов	Панель управления	Источники питания и распределительные щиты				
		Число ком- понентов	Интенсив- ность от- казов	Число ком- понентов	Интенсив- ность от- казов	Число ком- понентов	Интенсив- ность от- казов	Число ком- понентов	Интенсив- ность от- казов
ИМС	0,1	190	19,0	70	7,00	20	2,00	10	1,0
Диод	0,02	6	0,12	150	3,00	—	—	10	5,0
Диод	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Транзистор	0,05	—	—	60	3,00	—	—	—	—
Транзистор	0,3	—	—	—	—	—	—	9	2,7
Конденсатор	0,002	120	0,24	150	0,30	—	—	15	0,03
Конденсатор	0,04	—	—	—	—	—	—	3	0,12
Резистор	0,01	160	1,60	300	3,00	80	0,80	100	1,00
Резистор	0,1	—	—	—	—	—	—	2	0,20
Трансформатор	0,1	1	0,10	40	4,0	—	—	—	—
Трансформатор	0,2	—	—	—	—	—	—	3	0,60
Пайка	0,0001	4000	0,40	3000	0,30	400	0,04	200	0,02
Разъем	3,5	4	14,00	—	—	—	—	—	—
Разъем	2,0	—	—	2	4,00	—	—	—	—
Сердечник	0,00001	—	—	64К	0,64	—	—	—	—
Выключатель	0,2	—	—	—	—	25	5,00	—	—
Лампочка	0,5	—	—	—	—	50	25,00	—	—
Предохранитель	0,1	—	—	—	—	—	—	2	0,20
Выключатель сети	0,5	—	—	—	—	—	—	1	0,50
Вентилятор	3,0	—	—	—	—	—	—	1	3,00

Причина 1. ИМС – интегральная микросхема; ЗУ – запоминающее устройство.

Таблица 1.2. Общая интенсивность отказов и наработка на отказ мини-процессора

Модули (устройства)	Система с памятью 4 Кслов		Система с памятью 16 Кслов	
	Число устройств	Интенсивность отказов (число отказов на 1 млн. ч)	Число устройств	Интенсивность отказов (число отказов на 1 млн. ч)
Центральный процессор	1	35,46	1	35,46
ЗУ на магнитных сердечниках	1	25,24	4	100,96
Пульт управления	1	32,84	1	32,84
Источник питания	1	14,37	1	14,37
Весь процессор		107,91		183,63
Наработка на отказ, ч		9267		5446

для двух процессоров с разными конфигурациями оперативной памяти. Для них подсчитывается стандартная характеристика – наработка на отказ как обратная величина интенсивности отказов, умноженная на 10^6 , равная 9267 и 5446 ч для процессоров с памятью меньшей и большей емкости соответственно.

Периферийное оборудование и система в целом

Интенсивность отказов периферийного оборудования и его контроллеров может быть рассчитана аналогично тому, как это сделано в табл. 1.1. Так же оценивается общая безотказность системы. В табл. 1.3 приведены результаты расчетов для двух процессоров с различным периферийным оборудованием. Система А представляет наименьшую возможную конфигурацию вычислительной системы, у которой наработка на отказ снизилась до 894 ч из-за включения в систему пишущей машинки. Система В с дополнительной памятью, источником питания и периферийными устройствами имеет еще более низкое значение наработки на отказ, равное 352 ч. Следует учитывать, что полученные результаты характеризуют лишь средние значения. В действительности же на длительность безотказной работы оказывают определенное влияние способ и интенсивность использования электромеханических устройств. Например, в расширенной системе пишущая машинка будет, по всей видимости, использоваться главным образом в качестве средства связи между оператором и ЭВМ, а в базовой

Таблица 1.3. Ожидаемая безотказность для всей системы

<i>Система А</i>	<i>Число отказов на 10^6 ч</i>
Процессор с памятью 4 Кслов	107,91
Контроллер пишущей машинки	10,20
Пишущая машинка	1000,00
<i>Всего . . .</i>	<i>1118,11</i>
Системная наработка на отказ	894 ч

Табл. 1.3 (продолжение)

Система В	
Процессор с памятью 16 Кслов	183,63
Дополнительная память емкостью 48 Кслов	302,88
Контроллер пишущей машинки	10,20
Пишущая машинка	1000,00
Контроллер НМД	15,40
НМД	256,00
Контроллер НМЛ	14,30
НМЛ	345,00
Контроллер устройства ввода с перфоленты	10,50
Устройство ввода с перфоленты	250,00
Контроллер печатающего устройства	13,20
Печатающее устройство	420,00
Дополнительные источники питания и распределительные щиты	14,37
	Всего .. 2843,48
Системная наработка на отказ	352 ч
П р и м е ч а н и е. НМД – накопитель на магнитных дисках; НМЛ – накопитель на магнитных лентах.	

конфигурации она обычно постоянно используется в качестве средства ввода-вывода, что снижает надежность такой конфигурации. Надежность электронных систем тоже изменяется в зависимости от условий применения, особенно в тех случаях, когда не выявлены и не исправлены ошибки проектирования.

Программное обеспечение

В настоящее время не существует стандартных методов расчета надежности программного обеспечения, подобных разработанным для аппаратуры, хотя эта задача для программного обеспечения стоит еще более остро, чем для аппаратуры. Тем не менее программные ошибки принято относить к ошибкам проектирования, и в этом случае предсказание значения интенсивности отказов становится весьма затруднительным.

Трудности определения понятия отказа

Трудности в расчете надежности заключаются в том, что расчет достоверен в той мере, в какой достоверны принятые значения интенсивностей отказов. Для любой ИМС из различных источников могут быть найдены разные интересующие нас значения: от 0,01 до 0,4 отказа на миллион часов работы. Причина столь широкого разброса значений заключена в методе измерения и в самом определении понятия отказа.

Необходимо осознать, что достоверные данные по безотказности компонентов с низкой интенсивностью отказов могут быть получены только после многих миллионов часов их работы. При выпуске новой серии компонентов долгое время достоверное значение интенсивности отказов остается неизвестным, хотя эта серия уже широко применяется в проектировании аппаратуры. Поэтому производитель вынужден ориентироваться на прошлый опыт создания компонентов по подобной технологии и

применять соответствующие данные для предварительного расчета надежности новых компонентов.

Более приемлем метод оценки интенсивности отказов по результатам испытаний больших партий микросхем в течение довольно длительного времени при крайних значениях температур и других внешних факторов. Любой компонент, вышедший из строя в течение времени испытания, будет снят с испытания и проанализирован для выяснения причины выхода из строя. Возможно даже, что такой компонент не будет учтен как отказавший, если будет найдено, что незначительное изменение технологического процесса позволит устранить источник возникновения дефекта. После таких испытаний компонентов интенсивность отказов может быть оценена хорошо известными статистическими методами.

Подобный метод испытания партии компонентов с немедленной заменой любого компонента, признанного дефектным, характеризует первую трактовку понятия отказа. Именно дефектный компонент может дать только один отказ, до того как он будет заменен.

Интенсивность отказов, выводимая по результатам испытаний партии компонентов, зависит, во-первых, от наличия скрытых дефектов компонента, не обнаруживаемых выбранным методом испытания; во-вторых, от выполнения предположения, что компоненты будут использованы в соответствии с заданными на них техническими условиями, и, в-третьих, от того, как тесты контроля качества отсеивают компоненты с производственным браком.

При применении вычислительных машин для военных или космических целей принимаются дополнительные меры, которые позволяют достичь наименьшей интенсивности отказов. Трудно предположить, что можно достичь столь же низкой интенсивности отказов для универсальных ЭВМ, учитывая массовость их производства и ограничения затрат на их производство. Наряду с этим первоначальный проект ЭВМ скорее всего будет весьма далек от совершенства, а на учете всех требований по надежности скажется ограничение во времени, отводимом для проектирования. (О влиянии ошибок проектирования будет сказано в гл. 2 и 3). Поэтому для подобных систем производители будут, вероятно, стремиться к достижению средних значений интенсивностей отказов.

Еще один метод оценки интенсивности отказов компонентов или всей системы, принятый рядом производителей небольших ЭВМ, заключается в рабочей прогонке ряда систем в течение года или более, тщательном изучении каждого отказа и внесении предложений об изменениях в технологическом процессе или проектировании для преодоления возникших неприятностей и достижения таким образом желаемой надежности. Получаемые при этом результаты могут меняться в очень широких пределах, поскольку они зависят от внесенных предложений и используемых методов испытаний.

Несколько лет назад процессор, содержащий около 300 ИМС, проектировался с учетом требования наработки на отказ около 4000 ч в соответствии с покомпонентным расчетом при очень низкой интенсивности отказов компонентов. Позднее, на основе анализа результатов эксплуатации ряда систем, было объявлено новое значение — 10 000 ч. Еще позже, когда по-

явилась обратная связь от работающих систем, было обнаружено, что с точки зрения пользователя значение наработки на отказ находится в диапазоне от 100 до 2000 ч со средним значением около 300 ч. В то же время данные об эксплуатации систем, полученные производителем, показывали, что наработка на отказ превышает 600 ч. Изучение показало, что столь сильный разброс данных у пользователей вызван ошибками проектирования. Позднее об этом еще будет говориться, но уместен вопрос: откуда такое сильное различие между средними значениями, наблюдаемыми пользователем и производителем?

ОТКАЗЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Модели отказов

Ранее упоминалась первая трактовка понятия отказа, заключающаяся в том, что дефектный компонент может дать только один отказ. Однако на практике это не всегда верно, поскольку более 50% ошибок в работе компонента носят характер сбоев или перемежающихся отказов. Они не всегда могут быть легко воспроизведены стандартными методами испытаний, и поэтому пользователь не всякий раз обращается за помощью к инженерной службе. Подобные случаи приводят к типичной ситуации, представленной в табл. 1.4, где показано, что 50 дефектных компонентов могут вызвать 100 случаев инженерного исследования с заменой части компонентов, которые на самом деле исправны. Более того, отмечено проведение 50 бесполезных исследований, при которых испытательные программы не обнаружили каких-либо дефектов, и 200 случаев, в которых пользователь не вызывал обслуживающего инженера и предупреждал перезапуск системы и продолжение работы, чтобы не тратить довольно длительное время на исследования. В результате, если предположить, что

Таблица 1.4. Реальная безотказность центрального процессора

Тип событий	Число событий на 10 000 ч	Наработка на событие, ч	Соответствующее определение наработки на событие
Отказы, наблюдаемые пользователем	350	28,6	Среднее время между отказами системы или среднее время между системными прерываниями
Исследования, проводимые инженерами	150	66,7	Среднее время между исследованиями или обслуживаниями по вызову
Компоненты, подвергавшиеся замене или ремонту на месте	100	100	Среднее время между попытками ремонта
Замененные компоненты, оказавшиеся действительно неисправными, и компоненты, которые действительно требовали ремонта	50	200	Среднее время между отказами компонентов

50% дефектов неустойчивы, устойчивых дефектов будет 25, и они дадут 25 отказов системы, которые должны быть устранены, прежде чем продолжать работу. Вместе с тем случаи возникновения перемежающихся отказов вызвали 325 событий, т. е. 93% всех отказов системы обусловлено перемежающимися неисправностями. Все это показывает причины возникновения различных значений наработки на отказ, которые зависят от источника исходной информации. Поэтому следует более точно определить понятие отказа, а также объяснить различия в значениях наработки на отказ, приведенных в табл. 1.4.

1. *Отказы компонентов.* Это первая концепция, которую можно применить для определения понятия отказа в том случае, когда один дефектный компонент вызывает один отказ. Получаемые при этом числа характеризуют прогнозируемую безотказность, присущую конкретному проекту, а также позволяют, если дефектные компоненты идентифицируются, установить, что проектное значение безотказности достигнуто, или сделать вывод, что выбранные компоненты не удовлетворяют требованиям проекта.

2. *Попытки ремонта для сменных компонентов.* Приводимые здесь значения нужны для определения объема запасных компонентов, а также ресурсов, требуемых для испытаний и ремонтной службы.

3. *Инженерные исследования или вызовы службы обслуживания.* Эти данные обычно используются производителем в качестве характеристики безотказности оборудования при его реальной работе; их легче всего получить, поскольку производитель обычно имеет определенную форму отчетности о проведенных исследованиях дефектов. Эти данные используются также для планирования штата обслуживающего персонала.

Отношение числа инженерных исследований к числу отказов компонентов (число исследований на один отказ) является удобной мерой для характеристики сложности воспроизведения дефекта и восстановления системы инженером. (Обслуживаемость и контролепригодность будут рассмотрены в гл. 9). Для системы, представленной в табл. 1.4, эта характеристика довольно посредственна и равна $150/50 = 3$ исследованиям на отказ.

4. *Прерывания работы системы.* Чтобы не смешивать эти случаи с другими типами отказов, их лучше определить как события, наблюдаемые пользователем при полных остановках ЭВМ, системных прерываниях или системных отказах. Для системы в целом целесообразно ввести еще одну меру — число событий на один системный отказ, косвенно характеризующую отказоустойчивость системы. Число событий на отказ для системы, представленной в табл. 1.4, равно $350/50 = 7$, что говорит о довольно низкой отказоустойчивости, хотя известны случаи, когда были зафиксированы еще худшие значения, превышающие 10. Однако можно достигнуть числа событий на отказ менее 1,0. В этом случае отказоустойчивость системы такова, что позволяет сохранять систему работоспособной до периодов планового обслуживания, когда проводятся исследования причин отказов и восстановление системы.

Число событий на системный отказ зависит от характера отказов и отношения к ним пользователя. Некоторые пользователи склонны к по-

пыткам рестарта почти при каждом событии, в то время как другие требуют инженерных исследований при каждом событии, тем самым уменьшая общее число событий, но увеличивая время исследований.

С учетом различных типов возможных отказов, рассмотренных выше, термин "наработка на отказ" становится двусмысленным и потому нуждается в уточнении. Иначе, как следует из табл. 1.4, наработка на отказ системы может быть задана равной как 200, так и 28,6 ч, где первое число в действительности показывает наработку на отказ компонентов (компонентная наработка на отказ), а второе характеризует наработку на отказ системы с позиций пользователя (наработка на системный отказ или наработка на системное событие).

ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ

В книге не преследуется цель дать подробное введение в математическую статистику, однако полезно рассмотреть некоторые простейшие формулы, применяемые при расчетах надежности изделий, чтобы показать ограниченность их применения по отношению к универсальным ЭВМ.

Экспоненциальное распределение

Обычно предполагается, что сложному оборудованию свойственна постоянная интенсивность отказов и вероятность безотказной работы (вероятность успеха) в течение времени t

$$P_S = e^{-\lambda t},$$

где λ – число ожидаемых отказов за время t . Тогда вероятность отказа

$$P_F = 1 - e^{-\lambda t}.$$

В табл. 1.5 приведены примеры расчетов указанных вероятностей для оборудования, имеющего наработку на отказ 1000 ч и работающего в течение времени T ч. Из таблицы видно, что вероятность безотказной работы за короткий по сравнению с наработкой на отказ период довольно высока, но за период времени, равный наработке на отказ, это значение падает до 0,368, а для периода в 5 раз более длительного, чем наработка на отказ, вероятность безотказной работы практически равна нулю.

Введенное выше экспоненциальное распределение основано на предположении постоянной интенсивности отказов и случайном характере отка-

Таблица 1.5. Вероятность успеха (при наработке на отказ 1000 ч)

Время работы T , ч	Вероятность успеха P_S	Вероятность отказа P_f
100	0,905	0,095
500	0,607	0,393
1000	0,368	0,632
5000	0,007	0,993

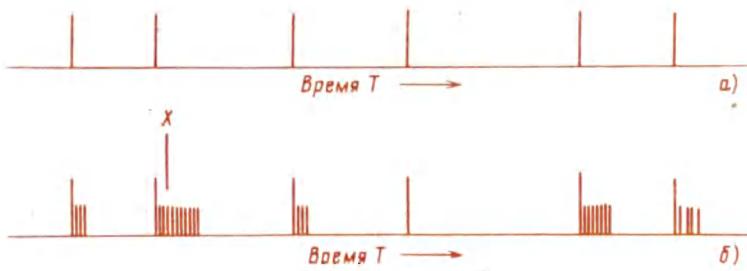


Рис. 1.2. Возникновение отказов за период времени T :

а – случайные отказы; *б* – случайные и перемежающиеся отказы

зов. Следовательно, у оборудования не должно быть периода "выжигания" дефектов и должны отсутствовать ошибки проектирования. Кроме того, это распределение игнорирует перемежающиеся отказы. На рис. 1.2,*а* представлено возникновение случайных отказов компонентов за время T , а на рис. 1.2,*б* – образование перемежающихся отказов, которые имеют тенденцию проявляться пачками сразу после возникновения отказа компонента. Если работа началась в момент времени, когда можно быть абсолютно уверенным, что перемежающихся отказов нет, то можно применять экспоненциальное распределение, если же работа началась в момент времени, отмеченный крестом на рис. 1.2,*б*, то достоверно рассчитать вероятность безотказной работы становится затруднительно.

Экспоненциальное распределение вполне успешно применяется в расчетах надежности военной и аэрокосмической техники одноразового применения, где применены соответствующие методы проектирования и испытаний. Для общепромышленных универсальных ЭВМ вследствие воздействия перемежающихся отказов и других видов сбоев расчет по формуле экспоненциального распределения настолько неточен, что его применение бесполезно.

Распределение Пуассона

При длительной работе оборудования (по сравнению с компонентной наработкой на отказ) важно знать число отказов, ожидаемых за данный период, а не вероятность их возникновения. Эти данные были бы полезны для планирования ремонта оборудования. В таких случаях при расчетах применяют распределение Пуассона, позволяющее подсчитать число случайных событий за некоторый период времени. Вероятность отсутствия отказа за время t также равна $e^{-\lambda}$, а полный список вероятностей имеет вид:

$$\text{вероятность нуля отказов} = e^{-\lambda};$$

$$\text{вероятность одного отказа} = \lambda e^{-\lambda};$$

$$\text{вероятность двух отказов} = \frac{\lambda^2}{2!} e^{-\lambda};$$

$$\text{вероятность трех отказов} = \frac{\lambda^3}{3!} e^{-\lambda};$$

$$\text{вероятность } n \text{ отказов} = \frac{a^n}{n!} e^{-a}.$$

Чтобы получить число месяцев или недель с 0, 1, 2, 3 отказами и т. д., следует умножить указанные вероятности на число периодов времени T на рассматриваемом отрезке времени t .

При расчете по распределению Пуассона характерны те же ограничения, что и для экспоненциального распределения, т. е. проектирование должно быть без ошибок, а отказы — случайны, как при оценке отказов компонентов.

В табл. 1.6 приведен пример реального распределения отказов за 34 мес на работающей системе, имеющей число событий на отказ, равное 2. В строке 1 табл. 1.6 приведено распределение событий, наблюдаемых пользователем. Было зафиксировано 17 мес работы без событий, 5 мес — с одним событием и т. д. В строке 2 приведены расчеты на основе предположения, что отказы подчиняются распределению Пуассона с тем же, что и в строке 1, значением среднего числа отказов в месяц, равным 1,352. Ясно видны различия между рассчитанными и реальными значениями. Зафиксированный отрезок времени работы без событий оказался почти вдвое большим, чем рассчитанный. Зафиксированные периоды для 4, 5 или 6 событий в месяц также много больше рассчитанных. В строке 3

Таблица 1.6. Число отказов на месяц

Тип отказа	Число месяцев (T)	Число отказов	Среднее число отказов на месяц (a)	Распределение месячных периодов с числом отказов						
				0	1	2	3	4	5	6
1. Системные отказы, зарегистрированные пользователем	34	46	1,352	17	5	4	3	2	2	1
2. Ожидаемые отказы в соответствии с распределением Пуассона	34	46	1,352	8,8	11,9	8,0	3,6	1,2	0,3	0,1
3. Ожидаемые отказы в соответствии с распределением Пуассона для отказов компонентов	34	23	0,676	17,3	11,7	4,0	0,9	0,1		

представлено распределение Пуассона для отказов компонента со средним значением числа отказов компонентов за месяц, равным 0,676 (1,352 событий в месяц при 2 событиях на отказ). Сравнение этих данных с реальными показывает влияние перемежающихся отказов. Для 17 мес была предсказана безотказная работа, и это значение совпало с наблюдаемым. Зато другие рассчитанные значения не совпадали с реальными, например получено 11,7 мес с 1 системным отказом, на самом деле их оказалось 5, в остальные месяцы было по 2, 3, 4, 5 или 6 системных отказов. (Подробный анализ этого явления изложен в статье автора "Analysis

of computer System Reliability and Maintainability”, –The Radio and Electronic Engineer, 42, № 12, декабрь 1972 г.)

Для систем с низкой отказоустойчивостью и обслуживаемостью различие в числе отказов, рассчитанных по распределению Пуассона, и реальных еще более значительно, могут существовать довольно высокие и равные вероятности для 0 и 50 событий за данный период.

После перечисления всех трудностей в определении, предсказании и измерении отказов можно не удивляться тому, что некоторые поставщики стараются избегать выпуска какой-либо информации по надежности, а у тех, кто все-таки делает это, трудно ожидать совпадения реального и рассчитанного поведения системы. Тем не менее очень важно, чтобы пользователь мог выбрать наилучшую конфигурацию системы и у лучшего поставщика, чтобы планировать свои действия на возникновение непредвиденных случайностей. Для этого он должен представлять виды возможных отказов, а также влияние на работу системы таких характеристик, как обслуживаемость, контролепригодность и отказоустойчивость. Модели отказов, отображающие влияние ошибок проектирования, ранних дефектов и дефектов, вызываемых внешними факторами, на надежность аппаратуры и программного обеспечения, будут рассмотрены в гл. 2, 3 и 5.

Глава 2

ИЗМЕНЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

СТАБИЛИЗАЦИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Ранние дефекты

Впервые собранная сложная аппаратура наверняка сразу не заработает из-за ошибок в разводке проводов, неправильной сборки или ошибок в выборе компонентов, да и сами компоненты могут оказаться неисправными из-за технологических недостатков. На различных стадиях изготовления изделия проводятся испытания в рамках контроля его качества, позволяющие устранить неисправные компоненты и исправить другие производственные дефекты. Обычно эти проверки гарантируют исправление устойчивых отказов, но некоторые перемежающиеся отказы могут остаться необнаруженными. Кроме того, ряд компонентов может обладать скрытыми внутренними дефектами, которые проявляют себя в течение короткого промежутка времени, например после термоциклирования или при включении и выключении питания. После выпуска оборудования обычно проводится серия испытаний при вводе его в работу, однако эти испытания проводятся на предприятии-изготовителе и не могут проверить все возможные варианты будущего использования. Почти наверняка эти проверки не охватывают всех возможных комбинаций значений и последовательностей данных. Поэтому ранние отказы могут по-прежнему проявляться даже после передачи изделия пользователю, что и отмечено



Рис. 2.1. Ранние отказы большого процессора 1-го типа

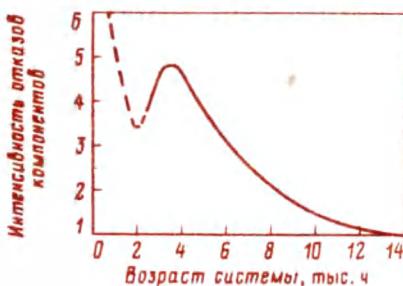


Рис. 2.2. Ранние отказы большого процессора 2-го типа после передачи пользователю:
— реальные измерения; - - - оценка для известных отказов за первые 2000 ч

на графике интенсивности отказов на рис. 1.1, а время стабилизации безотказности зависит от свойств конкретного изделия.

На рис. 2.1 приведен период "выжигания" дефектов для одного типа большого процессора, основанный на наблюдении свыше 500 отказов, и показано число отказов, обнаруженных после включения питания.

Основной период приработки падает на время прогона инженерных испытательных программ в течение первых 5 нед, или около 800 ч. После того как было начато испытание программного обеспечения и программ пользователя в течение некоторого периода интенсивность отказов возросла. Затем безотказность системы постепенно улучшалась, достигнув к концу годового периода (около 8000 ч) интенсивности замены неисправных модулей 0,2% в неделю. Некоторого улучшения удалось достичь путем введения в систему заново спроектированных модулей.

На рис. 2.2 для большого процессора 2-го типа показаны характеристики периода "выжигания", выведенные на основании свыше 100 устранившихся дефектов ряда систем, но на этот раз после передачи изделий пользователю. На ухудшение безотказности процессоров этого типа оказалась влияние деятельность пользователя в интервале от 2000 до 3000 ч (для системы это уже возраст от 6 до 9 мес), связанная с установкой и освоением процессора. Общее изменение интенсивности отказов после передачи процессора пользователю достигло отношения 5:1 или 6:1, т. е. интенсивность отказов на интервале от 4 тыс. ч и далее уменьшилась в 5–6 раз. Для процессора 1-го типа (см. рис. 2.1) это отношение составляло примерно 3:1.

На рис. 2.3 показано поведение большой системы 3-го типа на этапе появления ранних дефектов. Приведены данные о ежемесячных системных отказах по наблюдениям за 30 установленными системами. Поскольку здесь речь идет о всех событиях, наблюдавшихся пользователем, то можно отметить большее число кратковременных изменений безотказности.

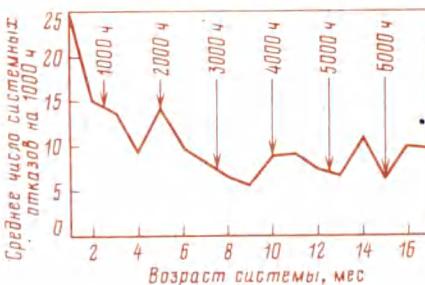
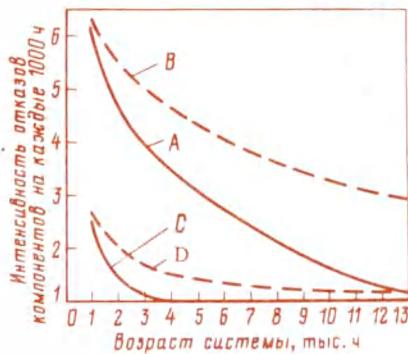


Рис. 2.3. Ранние отказы большого процессора 3-го типа после передачи пользователю

Рис. 2.4. Ранние отказы больших процессоров после передачи пользователю:

A – худший случай, одна ЭВМ; *B* – худший случай, семейство ЭВМ; *C* – лучший случай, одна ЭВМ; *D* – лучший случай, семейство ЭВМ



чем в предыдущих системах, где оценивалось только изменение безотказности компонентов. Однако среднее улучшение безотказности можно примерно оценить как 3:1, а время стабилизации – около 3000 ч. Хотя в этом случае доказательство не столь очевидно, но заметно ухудшение безотказности в первые 2000 ч работы системы у пользователя (этот период приходится на 5-й мес общей жизни системы).

Рассмотрев приведенные примеры, сглаживая кривые и рисуя их в одинаковом масштабе, можно найти диапазоны изменений интенсивности отказов в период "выжигания" дефектов после передачи системы пользователю. Это кривые *A* и *C* на рис. 2.4. Можно обнаружить, что период стабилизации безотказности может наступать в диапазоне от 3000 до 12 000 ч. Очевидно, что для системы с временем стабилизации 12 000 ч увеличение безотказности происходит автоматически, без какой-либо особой деятельности по улучшению процесса проектирования или обслуживания системы, и вызывается "выжиганием" компонентов со скрытыми дефектами или с критическими значениями параметров. Однако, как показано ниже, это зависит от организации проектирования и управления качеством. Если процесс проектирования допускает критические значения параметров, то при среднем или плохом управлении качеством изготовления некоторые компоненты с критическими значениями их параметров остаются невыявленными и могут привести к увеличению числа перемежающихся программно-зависимых отказов. Таким образом, период времени в 12 000 ч необходим для того, чтобы постепенно в системе оказались только надежно работающие компоненты. Уменьшение периода "выжигания" дефектов может быть достигнуто с помощью:

- 1) улучшения процесса проектирования в целях исключения работы компонентов в области критических значений параметров;
- 2) включения в систему специальных средств обслуживания, позво-

ляющих путем изменения характеристик аппаратуры выявлять компоненты, работающие в критических условиях;

3) улучшения управления качеством таким образом, чтобы качество применяемых компонентов соответствовало требованиям проекта. Например, это может быть специальный подбор компонентов с соответствующими значениями их параметров.

Семейство процессоров

До сих пор рассматривались надежностные свойства в течение раннего периода жизни изделия. При этом предполагалось, что общее число эксплуатируемых систем достаточно велико в статистическом смысле и позволяет правильно представить интенсивность отказов любой "средней" системы. При рассмотрении же безотказности семейства процессоров, находящихся на разных этапах их жизненного цикла, в конкретный момент времени картина несколько меняется. Кривые *B* и *D* на рис. 2.4 характеризуют общее число отказов, зафиксированных в течение каждого периода длительностью 1000 ч для двух различных семейств процессоров. В предположении постоянной интенсивности производства доля новых систем уменьшается с увеличением времени жизни и безотказность всего семейства постепенно улучшается. Эти кривые *B* и *D* представляют безотказность статистически "среднего" процессора по наблюдениям службы обслуживания. Хотя в конце интервала времени безотказность отдельных процессоров (кривые *A* и *C*) двух различных типов оказывается одинаковой, средние значения для семейств процессоров различаются довольно сильно. На отрезках времени свыше 12 000 ч (обычно через 2–3 года) требования к объему запасных частей и к обслуживанию для одного типа систем (кривая *B*) оказываются втрое выше, чем для другого типа (кривая *D*). Это плата за низкое качество изготовления.

Модели первой партии изделий

Обычно при рассмотрении интенсивности отказов семейства машин оказывается, что безотказность первой партии машин ниже, чем машин последующих поставок. Это вызвано несовершенством проектирования первых образцов и внесением многочисленных улучшений в последующие образцы. На рис. 2.5 изображена реальная кривая стабилизации безотказности для двух различных семейств процессоров примерно одинакового быстродействия в течение первых 5 лет жизни (по горизонтальной оси отложены полугодовые интервалы и считается, что за 6 мес система находится в работе в течение 2000 ч). Если учитывать только ранние отказы этих семейств (как на рис. 2.4, но для десяти 2000-часовых периодов), то можно увидеть, что за этот промежуток времени безотказность всего семейства систем увеличивается 2–2,6 раза, а для одиночной системы – в 1,7–5,2 раза. Кривые на рис. 2.5 получены с учетом не только ранних отказов, но и того, что в течение 5 лет в этих системах производились устранения ошибок проектирования, в результате которых компоненты работали в области критических значений параметров. При этом удалось

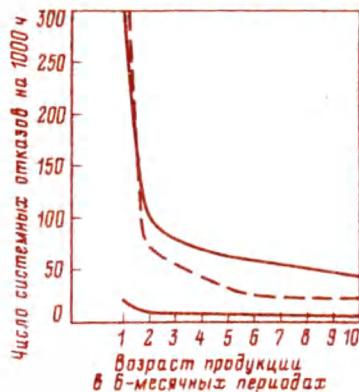
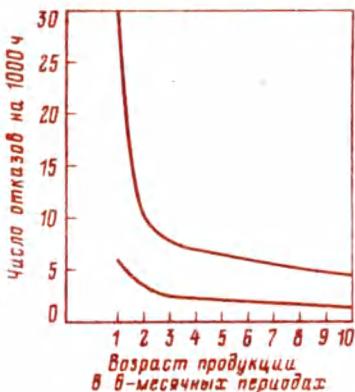


Рис. 2.5. Стабилизация безотказности двух различных семейств процессоров после первой поставки новой системы

Рис. 2.6. Стабилизация безотказности тех же процессоров, что и на рис. 2.5, но для системных отказов на 1000 ч (средние цифры за 6-месячный период) :

— система первой поставки; — семейство систем

увеличить безотказность рассматриваемых систем для лучшего случая (семейство *D*) в 4 раза, а для худшего случая (семейство *B*) – в 6,7 раза (рис. 2.5). Если рассматривать эффект улучшения систем только за счет устранения ошибок проектирования, то внесение улучшений в проект позволило увеличить безотказность семейства *D* в 4:2 = 2 раза, а безотказность семейства *B* в 6,8:2,6 = 2,6 раза. Аналогично можно показать, что безотказность отдельных первых машин может быть увеличена в 2–3 раза путем внесения улучшений в проект. Следует заметить, что для рассмотренных систем большинство улучшений сделано в течение первых 6 мес их работы. Конечно, производитель иногда вносит изменения и в течение более длительных сроков, но они в основном направлены на достижение частных улучшений, имеющих ограниченное влияние на общую надежность семейства.

На рис. 2.6 приведена кривая стабилизации безотказности тех же систем, что и на рис. 2.5, но не для отказов компонентов, а для системных отказов за 1000 ч. Как и на рис. 2.5, верхняя сплошная кривая характеризует семейство процессоров *B* (худший случай). Штриховой линией показано поведение первого образца этого семейства. Этот первый процессор обладал плохими показателями обслуживаемости и имел число событий на отказ около 10 по сравнению с 3 для процессора из семейства *D* (лучший случай). Этот лучший процессор корректно спроектирован и имеет хорошую систему управления качеством проектирования. Тем не менее и для него ввод в работу у пользователя выявил ряд новых проектных проблем. Худшая система (семейство *B* на рис. 2.4) прошла не столь тщательное проектирование, и хотя система управления качеством изготовления и проекта была удовлетворительной, тем не менее не удалось согласовать этот проект со слабой организацией обслуживания. Увеличение безотказности в период от 2 до 5 лет подобно показанному

для семейств систем на рис. 2.4. Однако различия в конечной безотказности двух рассматриваемых систем значительно большие, чем при рассмотрении отказов компонентов, что свидетельствует о различной безотказности отдельных процессоров по отношению к системным отказам в конце рассматриваемого интервала времени.

Ввод системы в эксплуатацию

Чтобы наглядно показать качественную разницу двух семейств систем, характеристики которых представлены на рис. 2.5, ниже приведена статистика отказов "средней" системы каждого семейства в период ввода в эксплуатацию для систем, поставляемых через 1 год после первого выпуска.

	<i>Система 1</i> (семейство D)	<i>Система 2</i> (семейство B)
Время испытаний, ч	100	1000
Отказы ИМС	4	52
Другие отказы процессора	5	42
Отказы ОЗУ	6	21
Общее число отказов системы базовой конфигурации	15	115
Отношение интенсивности отказов во время испытаний к средней интенсивности отказов семейства в последующее время	100 : 1	25 : 1
Число ИМС в базовой конфигурации (тыс.)	25	13
Доля ИМС (%), замененных в период испытаний	0,016	0,4

Анализ стабилизации надежностных характеристик очень труден, и его осложняют следующие факторы:

- 1) различие в поведении единичного образца и семейства систем;
- 2) наличие дефектных компонентов и скрытых дефектов в монтаже и микросхемах, причем различные системы сильно отличаются числом таких дефектов, и период "выжигания" скрытых дефектов может оказаться очень длительным, вплоть до 10 000 ч и более, что затрудняет определение момента стабилизации. Поэтому главной задачей должно считаться управление качеством проектирования и изготовления;
- 3) проблема корректности проектирования для первых образцов системы как на уровне компонентов, так и для всей системы в целом.

Отказы из-за внешних воздействий

Всякая инженерная деятельность не застрахована от возможности внесения ошибок, которые приводят к отказу компонентов. Вносимые в проект изменения могут быть не очень тщательно обоснованы или даже внесены с ошибкой, вызывая дополнительные трудности, иногда не связанные с теми, ради которых вносились изменения. При замене дефектного модуля контакты могут быть погнуты, а новый модуль может иметь скрытые дефекты (на запасных модулях дефекты обычно предварительно не "выжигаются"). Безотказность вычислительных систем зависит также от условий их применения, изменения нагрузки, длительности работы,

изменений в программах. Вносимые изменения могут как уменьшать интенсивность отказов компонентов, так и увеличивать ее.

Еще одним фактором, вызывающим трудности в проведении корректных оценок надежности, становятся ошибки, возникающие при проведении профилактического обслуживания плохо обученным персоналом или при изменении процедур обслуживания. В частности, почти всегда можно гарантировать накопление отказов, если определенная испытательная программа длится слишком долго. Дополнительный источник ошибок — изменение окружающих условий, таких как температура, изменение влажности, колебания сетевого питания, переходных сопротивлений в контактах. Все эти отказы из-за внешних факторов приводят к тому, что на практике трудно добиться стабилизации безотказности, показанной на теоретической кривой на рис. 1.1.

ОТКАЗЫ ИЗ-ЗА ИЗНОСА СИСТЕМЫ И ОЖИДАЕМЫЙ СРОК СЛУЖБЫ

Электронная аппаратура

Износ в электронной аппаратуре проявляется в возрастающем увеличении интенсивности отказов, когда большое число компонентов одинакового типа начинают отказывать примерно одновременно и либо отсутствует возможность их замены, либо это становится экономически невыгодно. Причины износа могут быть следующими:

- 1) высокая температура, приводящая к хрупкости проводного монтажа, к растрескиванию изоляции и нарушению паяк;
- 2) высокая влажность, вызывающая коррозию или электролиз. Известен случай, когда ЭВМ, построенная еще на лампах, пришла в негодность в результате избыточной влажности из-за миграции серебра;
- 3) загрязнение воздуха (например, пылью, солями, сернистым газом), являющееся причиной коррозии и нарушений контактов;
- 4) неудачно выбранные компоненты (некоторые компоненты, такие как резисторы и емкости, изменяются со временем, и даже так называемые высокостабильные компоненты могут изменить в течение нескольких лет свои параметры сверх допустимого уровня);
- 5) удары и вибрации, ослабляющие жесткость монтажа и вызывающие закорачивание проводников;
- 6) термоудары (из-за включений и выключений питания);
- 7) недостатки в управлении качеством производства. При первоначальной организации производства компонентов или систем возможно внесение различных загрязнений, образование слабых контактов, что не обнаруживается ни на стадии производства, ни в первый период эксплуатации и дает ухудшение надежности со временем;
- 8) введение нового технологического процесса, приводящего к новому виду износа компонентов, который невозможно было предвидеть при организации системы управления качеством производства. Например, в военных областях избегают применения пластмассовых корпусов для ИМС из-за возникновения термомеханических дефектов;

9) внешние воздействия при обслуживании и применении. После многочисленных замен или ремонтов штепсельные разъемы, проводной монтаж и другие соединения могут оказаться испорченными. При большой нагрузке быстро изнашиваются различные переключатели.

Особенно неприятные явления возникают при сочетании внешних воздействий при обслуживании с имеющимися дефектами, вызванными износом системы. Например, попытка замены изношенного контакта, находящегося в окружении треснувших или надломленных проводов, может вызвать окончательный выход системы из строя.

Для военной продукции, которая специально проектируется так, чтобы исключить некоторые из упомянутых недостатков, требуемое время жизни достигает 20 лет, при этом продукция может длительное время храниться без применения, а при работе попадать под действие вредных окружающих условий. Подобные примеры можно найти и в невоенных применениях, например в Британском почтовом ведомстве принят срок жизни телекоммуникационной аппаратуры 30 лет, но это не ЭВМ, а аппаратура, построенная на принципах модульности и избыточности.

Вычислительные машины

Отметим те факторы, которые оказывают влияние на отказы ЭВМ из-за износа:

1. Окружающая среда. Обычно средние и большие ЭВМ устанавливаются в помещениях, оборудованных кондиционерами и воздушными фильтрами, поэтому в течение длительных периодов температура и влажность существенно не меняются, а уровень загрязнения поддерживается минимальным. Удары и вибрация обычно очень незначительны, если исключить электронную аппаратуру периферийных устройств. ЭВМ обычно включены в течение длительного времени, если только нет перерывов в снабжении энергией, тем самым исключается влияние термоударов при включениях аппаратуры.

2. Компоненты и управление качеством производства. Обычно компоненты, используемые в коммерческих ЭВМ, не столь стабильны и дороги, как для военной аппаратуры, тем не менее и они достаточно тщательно отбираются в пределах допустимых затрат, чтобы гарантировать исключение недопустимых изменений параметров со временем, однако при проектировании допуски на значения параметров не всегда соблюдаются должным образом. Управление качеством в производстве коммерческих ЭВМ не достигает, конечно, того же уровня, что и для военной аппаратуры, и сильно различается у разных производителей. Поэтому не исключено применение дефектных компонентов и недоброкачественных пакетов, особенно с учетом тенденции использовать самые последние технологические новинки.

3. Конструкция. В большинстве современных ЭВМ применяются большие заменяемые модули, изготовление и выпуск которых продолжается в течение по меньшей мере 5 лет. Оказывается, что в конкретной ЭВМ в течение времени ее жизни подвергаются замене от 50 до 100% модулей. Поэтому весьма правдоподобно, что компоненты этих модулей оказываются от разных поставщиков и изготовлены в различных условиях. Если

у одного поставщика компонентов и возникает производственный брак, то он не приводит к полной деградации машины по надежности, хотя, конечно, надежность при этом будет невысокой, пока бракованный модуль не будет удален из машины. Конечно, есть и исключения из этого правила – когда ремонт модулей производится на месте. В этом случае до 90% и более исходных модулей остаются в машине по 10 лет и более.

Наиболее подвержены износу машины с неразъемными соединениями и незаменяемыми платами. Для машин с легко заменяемыми платами и с возможностью замены контактов разъемов эти проблемы менее актуальны, если, конечно, имеются необходимые запасные части.

Магнитная память на сердечниках в некоторых машинах подвержена повышенному износу, поскольку она содержит большое число перегибов и скруток проводов и много паяных соединений, хрупкие сердечники и некоторые другие компоненты, например считающие диоды (все в пределах одного большого модуля). Она подвержена значительным температурным колебаниям и, будучи довольно дорогой, не всегда имеется в запасе. Конечно, эта память может быть заменена на изготовленную по более современной интегральной технологии, но при этом можно столкнуться с рядом новых проблем (см. параграф "Улучшения и изменение нагрузки системы").

4. Внешние воздействия. Неподвижные контакты разъемов особенно подвержены износу, это вызывается частой заменой модулей, а на старых машинах классическим примером может служить нарушение гемонтажа при замене разъемов. Прекращение выпуска запасных модулей промышленностью приводит к внесению дефектов при ремонте этих модулей, и со временем уже нельзя доверять даже запасным модулям, подвергавшимся ремонту. Выходом из этого положения может быть изготовление собственных модулей, но это может оказаться очень сложным делом.

Собственно стойки большинства ЭВМ должны быть рассчитаны на срок 20 лет и более, но это не означает, что срок службы всей машины будет столь же длительным. В силу вышеупомянутых факторов, по-видимому, найдется лишь небольшое число систем, в которых можно было бы выявить симптомы износа после значительно более короткого периода, чем 20 лет, – ведь основная проблема заключается в выделении этих симптомов на фоне других.

Запасные части

Если надежность системы низкая и для поддержания ее работоспособности приходится часто вводить в работу запасные части, то со временем эксплуатация такой системы может стать экономически невыгодной. Изготовление запасных частей, например сложных модулей, может обходиться очень дорого, к тому же со временем промышленность перестает производить специализированные запасные части (например, редко применяемые ИМС).

Иногда появляется возможность замены на компоненты другого типа, но чтобы выполнить это, приходится идти на изменения в различных других частях схем, и не всегда возможно грамотно оценить последствия таких изменений. В таких случаях обычно уже неизвестны критерии,

которыми руководствовался при проектировании конструктор данной схемы.

На время жизни системы оказывает влияние и такой фактор, как хранение запасных частей и компонентов. Известно, что некоторые компоненты необратимо разрушаются при длительном хранении без применения. В свою очередь на время хранения оказывают влияние окружающие условия и условия транспортировки.

Периферийное оборудование

Все периферийное оборудование имеет в своем составе электронику, для которой проблемы износа весьма актуальны из-за влияния вибраций, наличия смазочных масел и пыли.

С точки зрения механической части можно продлить работу оборудования сколь угодно долго, если все составляющие можно заменить и нет недостатка в запасных частях. Реально, однако, не всегда можно своевременно заменить детали, подвергшиеся значительному износу, из-за сложности определения их действительного технического состояния и конструктивных трудностей доступа к ним. Поэтому со временем общий износ вырастает настолько, что для восстановления оборудования его приходится отправлять на завод для капитального ремонта или замены.

Обслуживание

По-видимому, самое существенное влияние на сокращение срока службы оборудования оказывает недостаточное обслуживание по причине отсутствия опытного персонала или из-за отказа производителя возобновить договор на обслуживание. Возможно, что часть службы сервиса способна заменить поставщиков некоторых систем, но для ряда систем не найдется в службе сервиса ни желающих, ни способных выполнить их обслуживание. Различные системы требуют разного уровня обслуживания. Сравнительно легко получить инженеров и обучить их нормальной эксплуатации системы, но иметь в своем распоряжении высококвалифицированного специалиста – это уже совсем другое дело. Конечно, для старых типов ЭВМ необходимость обращения за консультацией к внешним специалистам возникает очень редко, за исключением очень сложных систем, хотя опыт показывает, что ошибки проектирования встречаются и после 10 лет эксплуатации.

Большинство инженеров по обслуживанию предпочитают работать с более или менее новой техникой, и всякие попытки направления их на работу со старыми системами скорее всего приведут к их переходу на работу в другую организацию. А уход основного персонала по обслуживанию неизбежно приводит к сокращению срока службы подопечной системы.

Стоимость обслуживания

Для некоторых старых систем отношение их стоимости к эксплуатационным затратам ниже, чем для современных систем. Поэтому иногда

может оказаться экономически выгодным и даже желательным заменить старую систему новой, более современной системой, имеющей те же возможности, что и прежняя система. Это соображение становится выходом из положения в условиях увеличения стоимости обслуживания старых систем.

Улучшения и изменение нагрузки системы

Иногда нагрузка старой системы путем улучшений системы может быть значительно увеличена. Возможно, это потребует замены изношенного периферийного оборудования и ЗУ. Такого рода улучшения и замена отдельных устройств, однако, могут вызвать новые трудности в системе и даже ее останов. Перечислим некоторые из этих трудностей:

1. Маловероятно, что для старых систем удастся по прежнему описанию получить описание работы системы после ее модификации. Если вновь вводимые устройства имеют отличающиеся параметры, то система будет работать в режимах, отличных от прежних. Если не сделаны надлежащие проработки, то система вообще может оказаться неработоспособной.

2. Увеличение нагрузки и быстродействия вновь вводимого оборудования может натолкнуться на такое препятствие, как износ старого оборудования.

3. Всякое увеличение нагрузки (в том числе и времени работы) может вызвать снижение безотказности аппаратуры и уменьшение срока службы системы.

4. При проведении работ по модернизации возможны внешние воздействия, сокращающие срок службы системы.

5. При замене какого-либо узла на эквивалентный, но сделанный по новой технологии, с установкой его на старый процессор (а в нем токопотребление значительно) вполне возможно появление электрических помех для нового узла. Чтобы избежать этого, приходится перепроектировать старую аппаратуру.

Кондиционеры, силовое оборудование, помещение

Те же самые проблемы износа, что и для оборудования ЭВМ, характерны для кондиционеров и электросилового оборудования. В большинстве случаев они должны подвергаться капитальному ремонту или замене. Все это стоит довольно дорого и надолго выключает систему из работы. Дополнительные проблемы могут возникнуть от разрушения старых строительных материалов (покрытия стен и полов) и запыления ими воздуха помещений с ЭВМ.

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Методика

В гл. 2 было показано, что средняя безотказность процессора низкого качества за 5 лет может улучшиться в 5 раз путем "выжигания" дефектов и еще в 3 раза путем проектных улучшений. В большей или меньшей степени модернизации подвергается все оборудование, а объем вводимых изменений зависит от технологической новизны, используемой аппаратуры, архитектуры, основных принципов проектирования, тщательности отработки процедур проверки правильности проектирования, управления качеством производства и, наконец, окружающих условий работы. Все эти различные аспекты взаимосвязаны. Например, управление качеством должно соответствовать организации проектирования, проект, в котором много недостатков, требует лучшего уровня управления качеством, например специального подбора компонентов, отвечающих поставленным требованиям. Или другой пример: при плохом проекте система может хорошо работать, если окружающие условия – нормальные. Чтобы понять, как появляются ошибки проектирования, рассмотрим процесс проектирования.

Поскольку оборудование ЭВМ чрезвычайно сложно, то практически невозможно добиться того, чтобы первоначальная спецификация (технические условия) при проектировании была полной и корректной. Приемочные испытания могут гарантировать лишь отсутствие грубых логических ошибок, а проверить систему на всех возможных комбинациях и последовательностях функций и данных для всей системы практически невозможно. Поэтому в проекте почти наверняка будут логические ошибки, которые рано или поздно проявятся. С точки зрения пользователя эти ошибки имеют такие же признаки проявления, как и другие ошибки, связанные с безотказностью изделия, например многие из них могут проявляться как перемежающиеся отказы.

Как только сделан выбор базовой технологии, появляется возможность создания технологических карт, которые учитывают такие факторы, как нагрузочная способность, предельные температуры, конструкционные и временные ограничения. В то же время выбираются устройства и скорости их работы, размеры основного модуля и техника межсоединений. Проектирование превращается в поиск компромисса. Действительно, наивысшей безотказности можно достичь при минимальной нагрузке на компоненты, при работе на низких рабочих температурах и с широким времененным диапазоном. Однако подобная система будет скорее всего медленной и дорогой. Поэтому, чтобы добиться требуемого быстродействия, применяя минимальное число компонентов, некоторые части системы будут проектироваться при предельных значениях их параметров, заданных в технических условиях.

Результирующая безотказность

Ниже показано, что компоненты одинаковой сложности и одного года выпуска, работающие в одинаковых окружающих условиях, тем не менее могут различаться по безотказности в 5 раз. Основная причина этого – качество компонентов и корректность схемного проектирования. На блочном уровне рассмотрения безотказность различных блоков довольно мало изменяется благодаря тому, что наиболее надежные компоненты используются в больших количествах, чем малонадежные.

Например, средние и большие базовые конфигурации систем без блоков памяти, предлагаемые различными поставщиками примерно для одних и тех же целей, характеризуются следующими данными:

	Число ИМС, тыс. шт.	Число отказов на 1000 ч
Процессор A	10	0,77
Процессор B	26	0,56
Процессор C	38	0,27

Самый надежный процессор (*C*) оказался и самым большим по числу ИМС. Приведенные данные получены для большого семейства машин в течение первых 4 лет после выпуска с завода, хотя индивидуальная безотказность этих машин одинакового "возраста" (см. гл. 2) могла значительно различаться.

Качество проектирования

Для сравнения качества различных проектов введем показатель безотказности, вычисляемый следующим образом:

$$\text{Показатель безотказности} = \frac{\text{Число отказов за } 1000 \text{ ч работы}}{\text{Число ИМС, тыс. шт.}}.$$

Этот показатель представляет число отказов за 10^6 ч на одну интегральную микросхему с учетом также таких отказов, которые не являются отказами компонентов. Показатели безотказности рассмотренных выше процессоров *A*, *B*, *C*, в которых ИМС имеют одинаковую сложность по числу транзисторов на ИМС, таковы:

Процессор A	0,077
Процессор B	0,022
Процессор C	0,007

Видно, что более высокую безотказность имеют микросхемы в процессоре с наибольшим числом ИМС. (Заметим, что эти данные – средние по семействам, разница между низкими и высокими значениями показателя безотказности для более старых процессоров семейства может достигать соотношения 5:1.)

Приведенные значения относятся к семействам средних и больших процессоров. Большие процессоры, применяющие более быстродействующие элементы, но примерно такой же сложности, имеют показатель безотказности от 0,05 до 0,25. Как показано далее, компонентная безотказ-

нность мини-ЭВМ ниже, чем средних и больших ЭВМ, а безотказность блоков мини-ЭВМ, несмотря на их меньшую сложность, ненамного выше, чем у средних и больших ЭВМ. Частично причина низкой безотказности мини-ЭВМ кроется в применении более сложных компонентов и частично в худших в среднем окружающих условиях и, самое главное, в низком качестве проектирования.

Достоверные данные о безотказности микропроцессорных систем привести трудно, но следующий пример дает представление об этих числах для систем с малыми емкостями оперативной памяти (источники питания и каналы ввода-вывода не учитываются) :

	Число отказов на 1000 ч	Число ИМС, тыс. шт.	Показатель без- отказности
Мини-ЭВМ	0,1–0,6	0,2–1,1	0,2–1,0
Микропроцессор- ные системы	0,05–0,2	0,02–0,06	0,8–3,3

т. е. значение показателя безотказности для мини-ЭВМ и микропроцессорных систем значительно выше, чем для базовых конфигураций систем.

Нагрузка

Показатель безотказности как больших систем, так и мини-, микросистем существенным образом зависит от нагрузки системы. Большие ЭВМ спроектированы так, что большая часть рабочих операций производится со взаимным перекрытием во времени, что повышает нагрузку системы. Мини-ЭВМ проектируются так, чтобы использовать минимальное число компонентов с незначительной аппаратурной избыточностью для целей обслуживания, проверки или контроля, и поэтому меньшинство компонентов здесь полностью загружено.

В больших ЭВМ, однако, могут применяться многофункциональные блоки, содержащие значительно больше компонентов, чем однофункциональные, но загрузка этих блоков может быть относительно слабой, и поэтому показатель безотказности здесь может быть низким.

Можно высказать еще одну точку зрения на связь между проектированием и нагрузкой компонентов, заключающуюся в том, что чем ниже качество проектирования, тем больший разброс в значениях безотказности для оборудования одного и того же типа. Обычно это признается справедливым для электромеханических периферийных устройств, но не для электронной части оборудования. Некоторым подтверждением этому служит разная безотказность при различной интенсивности нагрузки. Конечно, эти соображения трудно признать доказательством, здесь нужны дополнительные исследования.

На рис. 3.1 показано соотношение между отказами системы и нагрузкой центрального процессора для ряда процессоров одного и того же типа с примерно одинаковым временем работы в течение месяца. Эти данные свидетельствуют о снижении безотказности по мере увеличения нагрузки. Помимо средних значений на рис. 3.1 приведены диапазоны числа системных отказов за 6-месячные периоды, откуда видно, что средние значения Представительны в статистическом смысле.

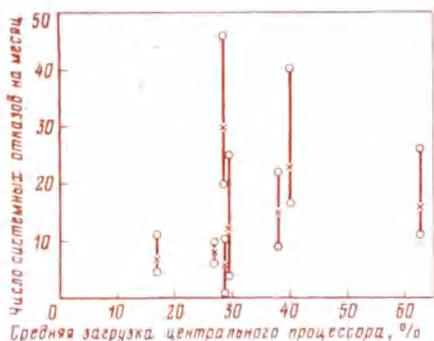


Рис. 3.1. Системные отказы вследствие отказов процессора в зависимости от загрузки процессора:

х – среднее значение; | – разброс значений за 6 мес.

Известно, что безотказность ЗУ на магнитных сердечниках зависит от его нагрузки. Например, для некоторых систем не рекомендуется непрерывный доступ к одной и той же области памяти, для других – умышленно замедляют доступ к памяти во избежание ее перегрева. Стандартные тесты для таких ЗУ используют непрерывный многократный доступ к одной и той же области памяти при таких входных воздействиях, которые порождают наибольшие помехи. Особенно много исследований сделано для сравнительно недавно появившейся МОП-памяти, для которой характерны чувствительность к комбинациям значений сигналов на входах и изменения временных соотношений в соответствии с нагрузкой. Как и для процессоров, увеличение нагрузки памяти вызывает рост интенсивности возникновения перемежающихся отказов, которая изменяется от устройства к устройству в соответствии с их нагрузкой.

Можно указать еще два аспекта, где нагрузка влияет на безотказность. Поскольку считается, что всякая электронная аппаратура время от времени подвержена сбоям, то во всех схемах, которые непрерывно участвуют в выполнении рабочих функций, эти сбои будут влиять на безотказность, приводя к увеличению числа необходимых инженерных исследований, большему числу замен микросхем и другой аппаратуры и, очевидно, большему числу отказов. Если же схемы загружены слабо, то, по-видимому, имеет смысл рассматривать только те их части, которые оказывают непосредственное влияние на их работу. Второй аспект связан с температурой переходов в интегральных микросхемах, оказывающей влияние на безотказность этих схем. Для некоторых видов технологий рассеивание тепла зависит от рабочей частоты переключений или от возможных изменений окружающей температуры. Проблемы отвода тепла связаны с конструкцией, условиями воздушного охлаждения, временными ограничениями и накладывают определенные ограничения на средства тестирования компонентов. Влияние температуры, которая по важности оказывается наиболее значительным параметром качества, более подробно рассмотрено в гл. 4.

Иногда на безотказность систем оказывает большее влияние периферийное оборудование, а не процессоры. Это каналы, контроллеры, шины данных и т. п., которые не столь сложны, как процессоры, но обычно менее надежны. И здесь помимо упомянутых проблем, связанных с нагрузкой, возникают новые, затрудняющие оценку безотказности систем,

связанные с большим разнообразием периферийного оборудования. В частности, чем выше быстродействие процессора, тем заметней влияние контроллеров периферии на снижение безотказности ЭВМ. В качестве примера рассмотрим число исследований на один отказ за 1000 ч работы контроллеров на ЭВМ со средним и высоким быстродействием:

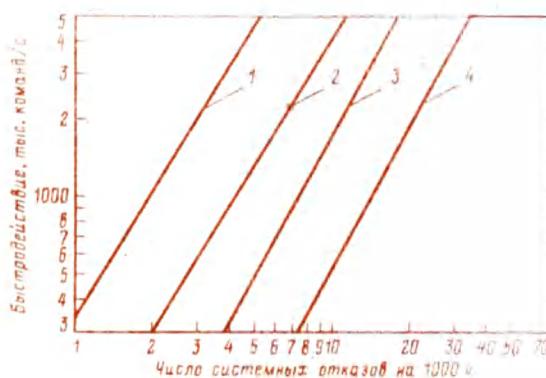
	ЭВМ со средним быстродействием	ЭВМ с высоким быстродействием
Процессоры связи	1,36	2,03
Контроллеры накопителей на сменных магнитных дисках	1,26	2,97

Новая технология

Как и следовало ожидать, после освоения и отработки новых технологических приемов или новой технологии общая безотказность систем повышается по сравнению с их более ранними типами (рис. 3.2). На рисунке показана зависимость числа системных отказов на 1000 ч работы от быстродействия процессоров больших и средних базовых конфигураций систем. Рисунок 3.2, конечно, идеализирован, но он основан на данных, приведенных в гл. 11. Этот рисунок показывает значительное уве-

Рис. 3.2. Системные отказы из-за отказов базовой конфигурации на 1000 ч работы:

- 1 – процессор на лучших ИМС, МОП-память с исправлением ошибок;
- 2 – процессор на ИМС, ЗУ на сердечниках с исправлением ошибок;
- 3 – процессор на ИМС, ЗУ на сердечниках;
- 4 – процессор на транзисторах, ЗУ на сердечниках



личение безотказности при переходе от транзисторной технологии к интегральной, введении корректирующих кодов для магнитных ЗУ на сердечниках, повышении уровня интеграции для процессоров, введении МОП-памяти с исправлением ошибок. Следует заметить, что сама по себе новая технология может не дать улучшения в безотказности. Так, в случае с динамической МОП-памятью при отсутствии исправления ошибок она дает большее число перемежающихся отказов, чем эквивалентное по емкости памяти магнитное ЗУ на сердечниках (см. параграф "Вопросы, которым не уделяют должного внимания").

МОДИФИКАЦИИ

В гл. 2 показано, что замена вышедших из строя из-за ранних дефектов компонентов на работоспособные улучшает безотказность системы.

Труднее даются попытки достижения большей безотказности путем устранения недостатков проектирования, которые связаны с серьезными изменениями в аппаратуре.

Как только ошибки проектирования обнаруживаются, то рано или поздно в зависимости от сложности задачи и возможностей конкретного производителя осуществляются технические изменения (модификации) системы. Когда эти изменения выходят на стадию производства, они становятся известными как "извещения о доработке". Помимо борьбы с проектными ошибками "извещения о доработке" могут выпускаться для увеличения безопасности обслуживания, улучшения заданных технических условий, достижения более совершенных показателей обслуживания или в связи с доработкой программного обеспечения. Известны случаи, когда процессоры разных изготовителей работают в условиях, где никогда не достигается заданное техническими условиями (спецификациями) проектное быстродействие. В таких случаях, обнаруживая несоответствие характеристик процессора заданным в технических условиях, фирма-изготовитель охотней идет на изменение спецификаций, чем на перепроектирование значительной части процессора.

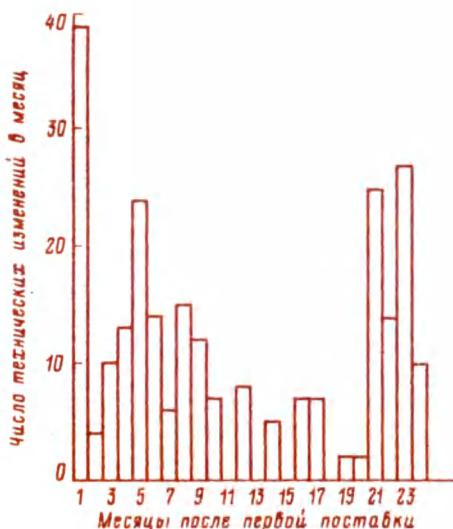
Для системы нового типа в первый год работы число доработок в логических схемах, как установлено, достигает 1/50 числа ИМС (т. е. 1/100–1/200 числа транзисторов), что дает примерно 400 "извещений о доработке" для сравнительно большого процессора, содержащего 20 тыс. ИМС. Число возможных изменений сильно зависит от новизны архитектуры и технологии, поэтому большинство изготовителей старается избегать сразу двух этих новшеств, чтобы облегчить борьбу с проектными ошибками. Процедуры введения изменений существенно зависят от принятых у изготовителей правил: иногда это могут быть обязательные для всех систем изменения, а иногда – только при проявлении ошибок в данной установке. Помимо "извещений о доработке", касающихся изменений в логических схемах, встречается еще и необходимость небольших механических переделок в конструкции и прочие "извещения о технических переделках", которые распространяются только на изготовителя. Необходимость этих переделок может быть связана, в частности, с изменениями специальных компонентов или при применении вновь разработанных компонентов.

Большой процессор

На рис. 3.3 дан пример "извещений о доработке" в логических схемах для впервые выпущенной системы, насчитывающей около 10 тыс. ИМС и имеющей примерно одну доработку на 80 ИМС в течение первого года. Начальный выброс числа доработок обусловлен изменениями, проводимыми в период от момента завершения испытаний перед отгрузкой системы потребителю, когда никакие изменения не производятся, и до установки у потребителя. Число доработок затем растет, достигая пикового значения через 5 мес, что вызвано обнаружением ошибок проектирования, проявивших себя в новых условиях у пользователя. Следующий пик на

Рис. 3.3. Модификации систем средних и больших базовых конфигураций

21-м мес вызван появлением новой модели системы и внесением соответствующих изменений в работающую систему, хотя вряд ли было целесообразно вносить эти изменения в самый первый вариант системы.



Мини-ЭВМ

На рис. 3.4 показаны все виды изменений, проведенных на мини-ЭВМ, содержащей около 800 ИМС.

а) *Изменения в документации.* Это изменения в технических чертежах, охватывающие период около 18 мес, с начальным выбросом числа изменений вскоре после поставки системы и вторым выбросом после введения нового класса задач у пользователя.

б) *Изменения в конструкции.* Обычно это изменения, обеспечивающие удобство сборки, изменения крепежа, размеров отверстий и т. п. Из рисунка видно, что изменения в конструкции стабилизируются в течение 12 мес после поставки системы и основные изменения приходятся на время до этого момента.

в) *Изменения в логических схемах и разводке проводов на производстве.* Они включают переделку печатных плат для сокращения внешнего монтажа, замену компонентов в целях удешевления продукции или из-за отсутствия снятых с производства компонентов. Производственный цикл изготовления мини-ЭВМ занимает всего несколько недель, поэтому большинство изменений делается еще до первой поставки системы потребителю, что отражено на рисунке выбросом числа изменений в момент первой поставки (нулевая неделя).

г) *Изменения в логических схемах и монтаже на производстве и в эксплуатации.* Эти изменения производятся из соображений увеличения безотказности, для преодоления опасных состояний в логике и достижения заданного в спецификации быстродействия и производительности. На рисунке отмечен первый выброс числа изменений на третьем месяце работы у потребителя, последующие выбросы обусловлены введением нового класса задач у пользователя, что потребовало определенных изменений в модулях системы. На первом году эксплуатации интенсивность введе-

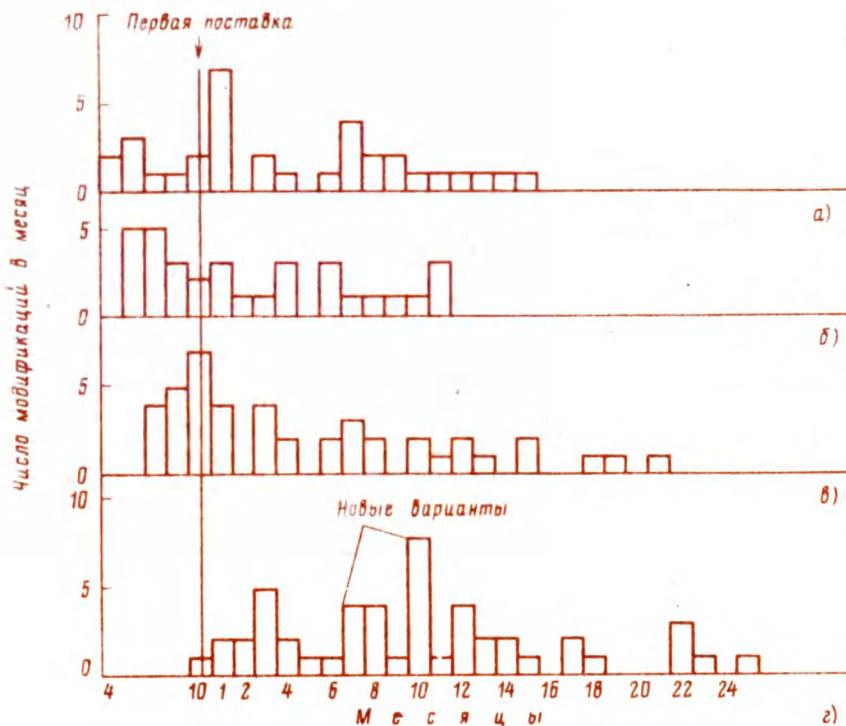


Рис. 3.4. Модификации мини-процессорных систем:

a – изменения в документации; *б* – заводские изменения в механике; *в* – заводские изменения в логике и монтаже; *г* – изменения в логике и монтаже, заводские и эксплуатационные

ния изменений составляла одну доработку на 25 ИМС. Если исключить доработки, вызванные введением новых классов задач, то эта интенсивность составит одну доработку на 40 ИМС. На втором году эксплуатации эта характеристика улучшается до одной доработки на 50 ИМС, но затем снова изменяется из-за очередного введения новых классов задач у пользователя.

Лучший случай

Приведенные примеры отражают наибольшее значение интенсивности внесения изменений. Возможны другие крайние случаи, когда эта интенсивность падает до 1 на 300–500 интегральных микросхем и даже еще ниже. Обычно это связано с системами, где широко используются автоматизация проектирования и моделирование схем с тщательной проверкой результатов "ручного" проектирования на корректность и соответствие заданным допускам по электрическим характеристикам. Пониженная интенсивность внесения изменений может ожидаться там, где применяется другая технология для построения системы с хорошо отработанной архи-

тектурой. Низкая интенсивность изменений сама по себе еще не гарантирует хорошего качества. Единственный способ удостоверить качество – это оценить надежность конечного результата. Наконец, следует отметить, что при рассмотрении числа изменений за заданный период, т. е. интенсивности улучшений, следует учитывать объем исходных данных – число систем и разнообразие условий их применения, а также наличие эффективных процедур выявления проектных ошибок.

ГАРАНТИЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Вопросы организации производства

При посещении и ознакомлении почти с любым предприятием, производящим вычислительную технику, прежде всего рассказывают о гарантировании качества выпускаемой продукции и об управлении качеством. Обычно это включает в себя техническую политику изготовителя, структуру отчетов, техническую документацию и различные стандарты – национальные, международные и военные. Ознакомление на предприятии с автоматизированным изготовлением продукции и машинными средствами тестирования направлено на то, чтобы усилить впечатление о высоком качестве производимой продукции. К сожалению, большинство методов управления качеством основано либо на статистическом выборочном контроле, пригодном для оценки массовой продукции, либо на методах испытания аппаратуры, предназначеннной для военных целей. Трудно подвергать сомнениям теоретическое обоснование этих методов. На практике принят подход к общей оценке качества изделия путем сравнения его надежностных характеристик, полученных в реальных условиях, с подобными характеристиками конкурирующих систем.

Ранее отмечалось, что управление качеством должно соответствовать процессу проектирования. Качественный проект при минимальном тестовом обеспечении может дать такую же безотказность, как и плохой проект с самым совершенным тестовым обеспечением. Аналогично, если выпускаемые изделия обладают высоким качеством, затраты на организацию управления качеством могут быть снижены. Общепринято, что вопросы деятельности служб гарантии качества (отделов технического контроля) не должны доводиться до сведения управляющего производством. При высококачественной продукции эта практика может не оказывать отрицательного влияния на производство, однако для продукции низкого качества нужна достаточно мощная служба гарантии качества, что требует руководящего вмешательства сверху.

На практике встречаются обе эти крайности. Изготовитель может выпускать системы с низким качеством процесса проектирования и иметь слабые гарантии качества производства. При этом критерии успеха изготовителя будут меняться в зависимости от его решения – перейти к тестовым испытаниям или проигнорировать полученные результаты. В другом крайнем случае может быть прекрасно спроектированная система с регулярными тестовыми испытаниями, и тогда успех превзойдет все ожидания. Сравнивая процедуры испытаний машин базовой конфи-

гурации и мини- машин, можно заметить, что затраты на испытания последних более обременительны, что, по-видимому, и должно быть в силу присущего им более низкого качества.

В последующих параграфах будут рассмотрены виды испытаний, их длительность и критерии оценки успеха изготовителя для различных уровней управления качеством или гарантии качества, применяемых при проектировании и производстве вычислительных систем. По мере необходимости отмечается разница в методах для мини- машин и машин базовых конфигураций.

Качество проектирования

Гарантия качества направлена на обеспечение такого проектирования, которое удовлетворяло бы в смысле затрат различным критериям, таким как простота производства, надежность и др. Сюда же включаются мероприятия по организации проверки правильности проектирования или проверки первых образцов продукции с целью убедиться, что исходные спецификации выполнены.

Предварительные требования к качеству будущего изделия обычно получают из расчетных оценок и оценок компонентов и блоков системы, как только эти последние оценки становятся известными. Сложнее обстоит дело с испытаниями всей системы. Состав и достоверность испытаний сильно зависят от программного обеспечения системы. Обычно аппаратура изготавливается раньше программного обеспечения, и когда они стыкуются, проявляются различные ошибки проектирования, вынуждающие изменять принятые решения. Пользовательские программы должны, например, обеспечивать возможность проверки системы на устойчивость к воздействиям окружающей среды.

По-видимому, каждая существенная стадия создания системы должна пройти испытания, с тем чтобы убедиться, что спецификации на устойчивость к воздействиям окружающей среды соблюdenы (см. гл. 4). Это испытания на влияние температуры и относительной влажности, электромагнитных помех, ударов и тряски, чувствительности к атмосферным загрязнениям, колебаниям напряжения и частоты сети, перерывам в подаче энергии. На последней стадии производства, по-видимому, еще следует промоделировать процесс транспортирования оборудования потребителю.

Не все поставщики имеют оборудование, позволяющее выполнить указанные испытания. Некоторые, например, не имеют больших климатических камер и вынуждены транспортировать всю систему для выполнения климатических проверок в другую организацию или использовать пластиковую пленку для создания подобия климатических камер и проведения там ограниченных испытаний. Некоторые впадают в другую крайность и подвергают свои системы указанным выше испытаниям непрерывно в течение 2–3 нед, даже пропуская рабочие программы в системе, установленной, например, на вибростенде.

На ранних стадиях оборудование проверяется также пропуском испытательных программ и программ пользователя. Производительность системы (ее быстродействие) проверяется различными техническими сред-

ствами и специальными пользовательскими программами для оценки временных характеристик. Аккуратное измерение безотказности обычно недоступно производителю (см. гл. 10), поскольку потребовало бы работы в течение тысяч часов. Однако устойчивость к изменениям уровня напряжения питания и тактовой частоты может быть проверена сравнительно несложно.

Не представляет труда проверка устойчивости к различным конфигурациям периферийных средств. Вместо измерения безотказности можно пойти на удлиненную во времени прогонку системы с оценкой числа системных ошибок в течение этого периода.

Поскольку более крупные системы потребуют, по всей видимости, большего числа изменений в исходном проекте, то одним из главных критериев должно стать стабильное проектирование, позволяющее достичь требуемых от системы свойств. Можно не сомневаться, что любые недостатки в проектировании обязательно проявят себя в виде отказа системы.

Обычно сразу после проведения начальных испытаний появляется публикация о создании новой системы, а испытания по проверке проекта продолжаются вплоть до отправки системы первым потребителям. Стабильность проекта таких первых систем в значительной мере зависит от размеров системы и вкладываемых в разработку проекта средств. Известны случаи, когда производители больших систем изготавливали первые 10 образцов-прототипов для внутреннего использования и испытания в течение года, прежде чем отгрузить продукцию потребителю. Эти системы использовались для разработки программного обеспечения, прогонки типовых задач потенциальных потребителей, разработки прикладных программ и решения различных внутренних задач производителя. Разработка окажется тем успешнее, чем тщательней будут учтены все проблемы, вызванные недостатками проектирования, и когда есть полная гарантия, что все изменения в аппаратурной и программной частях системы внесены во все экземпляры, несмотря на то, что это может оказать влияние на ту текущую работу, которую эти системы выполняют.

При производстве мини-ЭВМ большинство изготавителей не только оставляют у себя первые экземпляры машин, но и поставляют их прототипы ряду определенных пользователей, чтобы выявить различные дефекты проектирования в реальных условиях применения.

Подобным испытаниям по проверке качества проектирования подвергаются сначала изолированно отдельные экземпляры периферийного оборудования, а затем их включают в систему и проверяют на расширенных системных тестах.

Подбор компонентов

У всех изготавителей вычислительных систем существует твердое собственное мнение, как следует оценивать компоненты, предназначенные для работы в их системах, можно ли доверять тем или иным производителям компонентов и их методам управления качеством продукции. В конце концов обычно выбираются доступные на рынке компоненты, которые поставляются из разных источников, что, с одной стороны, га-

рантирует более надежное снабжение, интенсивную обратную связь от потребителей компонентов к изготовителям для устранения различных недоработок в логических схемах и конструкции, а также в организации контроля качества компонентов, но, с другой стороны, порождает некоторые дополнительные трудности при проектировании системы, связанные с различием параметров одинаковых микросхем у разных производителей.

Иногда приходится выбирать компоненты, выполненные по новой технологии, которая, возможно, вскоре станет общепринятой. Но первые потребители такой продукции могут встретиться с новыми, неизвестными им недостатками компонентов, что усугубляет трудности, обычные при разработке новой системы.

Некоторые изготовители ЭВМ начинают проектировать собственные компоненты, опираясь чаще на известную технологию, а затем ищут организацию, которая взялась бы за их выпуск. Такой подход позволяет достичь лучшего соотношения стоимость/производительность, но опять увеличивает трудности проектирования.

При мелкосерийном производстве изготовители систем стараются получать компоненты из одного источника, оправдывая это тем, что различные поставщики пользуются различными приемами проектирования, производства и тестирования компонентов, а с единственным поставщиком можно заключить более продуманный договор и заинтересовать его в разрешении трудностей, возникающих при работе с его компонентами. Конечно, такой подход чреват возможными сбоями в поставках компонентов в случае возникновения каких-либо производственных трудностей, но это может быть частично преодолено созданием некоторых запасов.

Контроль качества компонентов

Входной контроль качества компонентов в настоящее время выполняется в соответствии с хорошо отработанными стандартами, определяющими объемы выборок и методы тестовой проверки. Для ИМС применяются довольно обширные испытания:

проверка на постоянном токе; проверка на переменном токе; измерение параметров, проверка маркировки, проверка качества паяк, проверка на устойчивость к вибрации и ударам, проверка прочности выводов, термоудары и термоциклирование, устойчивость к влаге, удаление корпуса и проверка внутренних размеров и состояния гальванического покрытия.

Многие изготовители не ограничиваются простыми контрольными выборками и выполняют первые три упомянутые проверки или отдельные из них для 100% компонентов. Критерии управления качеством изменяются от отбраковки целых партий, если превышен установленный процент брака, до отбраковки только дефектных компонентов. При проверках входные воздействия поступают с испытательного оборудования, управляемого либо вручную, либо полуавтоматически, либо автоматически с изменением длительности и периодичности испытаний. Иногда

потребитель организует более жесткие проверки, чем это предусмотрено поставщиком, с целью отобрать компоненты для специального применения.

При выборочной проверке размер выборок и допустимый уровень качества определяется соответствующим промышленным стандартом. Тем не менее для некоторых испытаний изготовитель может применять военные стандарты или вводить новые методы проверки для выявления более широкого класса возможных дефектов.

Интенсивность отбраковки даже для сравнительно простых ИМС может достигать 0,1–5% и более для индивидуально проверяемых компонентов при 100%-ном контроле, и 5–25% при браковке всей партии по результатам выборочного контроля.

Для ИМС более высокого уровня интеграции, включая память и микропроцессоры, помимо рассмотренных испытаний необходимо еще проводить 100%-ное "выжигание" дефектов в термопечах при температуре до 50°C в течение 8–24 ч, подавая функциональные тесты при граничных значениях напряжений и временных характеристик. Это дает в результате интенсивность отбраковки от 5 до 25% для индивидуально проверяемых компонентов и до 50% – при выборочном контроле с отбраковкой всей партии. Следует отметить, что не все производители идут на применение "выжигания" дефектов.

Подобные испытания проводятся и для тех компонентов, которые производятся собственными силами, как, например, печатных плат и генераторов.

Испытания модулей

Практика показывает, что после установки компонентов на плате и последующей пайки волной до 20% модулей имеют дефекты в пайках. Эта цифра может быть и большей, если технологический процесс пайки плохо отложен.

После этой операции ряд модулей может быть полностью выбракован, однако бесполезно говорить о каком-либо выходе абсолютно годных плат, поскольку ограниченное число дефектов на плате, вероятно, допустимо.

Из-за большого разнообразия типов печатных плат целесообразно проектировать и строить для них универсальные тестеры. Испытания могут длиться от долей секунды на простых пультах-компараторах до нескольких минут для сложных функциональных тестов с изменяющимися граничными значениями параметров и вибровоздействиями. Платы мини-ЭВМ часто испытывают в работающем исправном процессоре. Можно указать и таких изготовителей, которые прогоняют тесты в течение нескольких часов при повышенных температурах. МОП-память помимо испытаний на "выжигание" дефектов на уровне компонентов подвергается еще тестовой проверке в печах в течение нескольких минут. И для микропроцессорных плат даже при интенсивном производстве не редкость испытания, длиющиеся в течение 24 ч при температуре около 50°C. На этапе проверки модулей может оказаться, что дефектные моду-

ли составляют 50%. Повышенная доля отбракованных модулей не обязательно свидетельствует о низком качестве производства, а скорее о высоком качестве функциональных испытаний или о плохой проверке компонентов при входном контроле. Подобным образом высокий процент выхода годной продукции может свидетельствовать не о том, что технологический процесс хорошо отлажен, а о том, что испытания очень слабые.

Измерения процента выхода годной продукции нужны в основном для обнаружения отклонений в технологическом процессе в целях управления качеством изготовления.

Модули, используемые для построения новых блоков и систем, в дальнейшем обычно подвергаются интенсивным испытаниям. Но эти же модули, поставляемые потребителю в качестве запасных частей, таких испытаний не проходят. Это приводит к тому, что 4–20% модулей оказываются неисправными после транспортировки, а в реальных условиях применения становятся источниками перемежающихся отказов.

Испытания блоков

Испытания электронных блоков больших систем обычно не зависят от того, находится блок в составе системы или нет. Длительность испытаний для процессора, памяти или контроллера может изменяться от 2 ч у одних изготавителей до 10 дней у других. При испытаниях могут применяться различные критерии оценки качества. Могут допускаться отказы даже при 2-часовых испытаниях. Для 10-дневного испытания может применяться в качестве критерия успеха условие непрерывной безотказной работы в течение 24 ч. На одной системе среднего размера процессор помещался в нагревательную камеру и подвергался термоциклированию в течение 24 ч, после чего следовали испытания — критерием было требование 8-часовой работы без отказов. Подобному термоциклированию подвергалась полупроводниковая память. Процессоры мини-ЭВМ, память и некоторые дополнительные устройства часто испытываются в более тяжелых условиях, чем остальные устройства, входящие в базовую конфигурацию. Эти испытания включают вибрацию и термоциклирование каждого блока непрерывно в течение 2 сут. Однако известны случаи, когда испытания занимали всего 15 мин, если после первого прогона не было обнаружено ошибок.

Периферийные устройства иногда испытываются в течение 2 ч, после чего отсылаются на место установки. Такая проверка дает 95% гарантии, что периферийный блок собран правильно, но это означает, что один блок из 20 может оказаться дефектным. В других случаях эти блоки испытываются в течение 2–3 дней и затем отсылаются на место установки, где снова подвергаются проверке.

Длительность прохождения испытаний существенно зависит от среднего числа отказов на блок. Это число может быть менее 1 на блок, а для блоков больших систем базовой конфигурации с тщательным испытанием может потребоваться замена до 10% модулей и коррекция многочисленных монтажных ошибок.

Испытания систем

Испытания системы в определенных случаях выполняются для одного экземпляра системы из производственной партии, остальные системы отгружают потребителю, ограничиваясь испытаниями на уровне блоков памяти, процессоров, каналов и периферийных устройств. В процессе разработки и испытания системы обычно применяют последовательность испытаний, в том числе граничных, проверку на реализацию всех предшествовавших изменений системы и, наконец, приемочные испытания службой гарантии качества. При этом варьируются:

1) *конфигурация системы.* Конфигурации могут изменяться от эмуляторов или минимально необходимой конфигурации для прогонки испытательных программ на стандартной заводской аппаратуре до полной конфигурации системы в соответствии с техническими условиями, включая соединительные кабели. Проверка полной конфигурации системы конкретного пользователя широко распространена для мини-ЭВМ;

2) *тесты.* Они меняются от отдельных испытательных программ, выполняемых с помощью инженерной панели, до тренировочных программ, выполняемых под управлением операционной системы, поставляемой вместе со всей системой;

3) *окружающие условия.* Для большинства систем это проверка границ питающих напряжений и изменений тактовой частоты, проводимых при нормальной температуре. Отдельные системы могут подвергаться испытаниям при повышенной температуре. Некоторые мини-ЭВМ полной конфигурации, включающей всю пользовательскую периферию, проходят термоциклирование в течение суток и более;

4) *длительность испытаний.* Для больших систем длительность испытаний, включая приемочные испытания, меняется от 2–3 дней до нескольких недель. Для мини-ЭВМ весь цикл сборки и испытаний может составить менее 2 дней, включая только 4–5 ч на испытания. Известны и крайние случаи, когда мини-ЭВМ испытываются в течение 3 нед или более, а наименьшая конфигурация – как минимум 50 ч;

5) *критерии успешных испытаний.* Они могут изменяться от требования исправной работы в течение каждого пропуска испытательной программы, занимающего несколько минут, или требования более тщательного испытания, при котором считается приемлемым появление ряда отказов, до требования многочасовой работы без возникновения отказов.

Упаковка и отправка системы потребителю

При отправке вычислительной системы потребителю, несмотря на тщательную проверку на заводе, сплошь и рядом допускаются такие нарушения, как недоставка какого-нибудь узла, ошибки в документации на программное обеспечение или в испытательных программах и даже повреждение оборудования. Большая часть недоставок или замен одного узла другим возникает во время разборки и последующей упаковки готовой системы (например, от 10 до 20% кабелей упаковываются не там, где они должны быть). Дополнительные неприятности приносит оставле-

ние готовой продукции, прошедшей окончательную проверку, в цехе – всегда найдется желающий “одолжить” на время заведомо работающий блок системы. Еще одна причина ошибок в документации, когда периферийное оборудование, матобеспечение и документация посылаются потребителю из разных источников и при наладке системы выясняется, что в отдельных местах они противоречат друг другу из-за появления несовместимых модификаций в процессе доработок. Некоторые изготовители пытаются преодолеть все эти трудности путем гарантии полной проверки на заводе состава отсылаемого оборудования, включая магнитные ленты с нужным программным обеспечением: после разборки отлаженной системы и последующей ее упаковки все ящики снова освобождаются и все их содержимое проверяется на соответствие спецификации.

Доставка системы потребителю часто вызывает серьезные повреждения аппаратуры. В больших системах, отправляемых по воздуху, почти всегда найдется хоть один сильно поврежденный блок. Обычно вместо поврежденного блока срочно высыпается новый, но здесь возникает другая неприятность – новый блок не так тщательно испытан в составе всей системы, как поврежденный старый.

Данные об эксплуатации и анализ дефектов

Можно уверенно сказать, что в полном цикле управления качеством сбору данных об эксплуатации у потребителя и анализу дефектов уделяется мало внимания. Обычно записи обнаруженных дефектов ведутся в форме, мало пригодной для последующего применения, например на таких этапах, как:

1) *оценка качества проекта* при проверке правильности проекта и введения различных изменений в проект. Записи часто составлены таким образом, что по ним невозможно понять, можно ли было обнаружить соответствующие недостатки на более ранней стадии;

2) *производство* чтобы убедиться в соблюдении качества выполнения определенного процесса. Записи обычно ведутся в такой форме, которая не позволяет провести их сопоставление с остальными производственными процессами или оценить их влияние на безотказность системы при будущей эксплуатации;

3) *получение данных по эксплуатации* для выявления необходимых затрат на обслуживание системы. Записи обнаруженных дефектов часто несопоставимы для разных систем. В результате конкретной системе уделяется внимание лишь тогда, когда от потребителя приходят на нее рекламации. Поэтому обычно остается неизвестной истинная интенсивность событий, наблюдаемая пользователем;

4) *организация ремонта модулей* при определении необходимого объема запасных модулей и проверке теоретически рассчитанной интенсивности отказов модулей. Последняя может быть сопоставлена с безотказностью блоков, полученной из анализа данных по эксплуатации, и некоторые производители используют данные такого сопоставления для улучшения отбора компонентов и качества изготовления, в то время как другие этими данными пользуются для вмешательства в процесс проектирования с точки зрения повышения надежности продукции;

5) *ведение журнала ошибок* для выработки требований к профилактическому обслуживанию и получения диагностических данных по конкретной установке. Обычно изготовители систем не занимаются сравнительным анализом журналов ошибок и вообще статистическим анализом надежности конкретных систем. Правда, существуют специальные организации, которые для некоторых типов систем создают собственную службу анализа данных журналов ошибок систем с подробным сравнением данных по различным блокам и выявлением закономерностей;

6) *программное обеспечение*; документация по дефектам программного обеспечения в принципе отличается и отделена от документации по дефектам аппаратуры, хотя для многих типов отказов трудно определить, что является их источником — программное обеспечение или аппаратура (см. гл. 5).

Вопросы, которым не уделяют должного внимания

Большинство изготовителей ЭВМ старается совершенствовать анализ перечисленных выше результатов обратной связи от потребителя для выявления недостатков процесса проектирования и производства на уровне компонентов, модулей или блоков. Поскольку, однако, этот анализ выполняется не для индивидуальной системы, а для семейства однотипных систем, некоторые недостатки систем остаются скрытыми. Зачастую производитель сознательно скрывает недостатки индивидуальных систем, пользуясь средними данными для семейства систем, чтобы доказать достижение заданных в спецификации требований по надежности к системе, а не для того чтобы добиться наивысшей надежности каждой системы. Там, где вопросы ремонтопригодности системы игнорируются, вызывая большое число инженерных исследований на один отказ, единственный путь увеличения безотказности — это организация работы по анализу, выявлению и устраниению причин большого числа недоработок в системе.

Следует обратить внимание на такие характеристики:

1. Интенсивность событий, исследований и отказов системы, блоков, модулей и компонентов — анализ в зависимости от применения, окружающих условий, длительности ежедневного включения, времени дня, дня недели, производственной партии или от возраста системы. В частности, следует вести записи о том, из какой партии компонентов собирался тот или иной модуль. Только ограниченное число производителей ведет такие записи.

2. Интенсивность замены или интенсивность отказов модулей и компонентов — исследование места возникновения физического дефекта и его связи с функциональным назначением. Исследование одного из процессоров показало, что некоторые модули размещались в области ввода-вывода или находились в нижней части процессорной стойки и заменялись гораздо чаще. Оказалось, что в этих местах повышенная температура. Другим поучительным примером в анализе отказов может служить поведение одного производителя, который каждый раз тщательно исследовал проект, если оказывалось, что на двух процессорах из небольшой

партии начинали выходить из строя одинаково расположенные микросхемы. Следует заметить, что при чисто вероятностном механизме трактовки отказов компонентов такое событие чрезвычайно редко.

Наибольший успех в разрешении только что упомянутых задач достигнут там, где есть централизованная служба качества, ответственная за сбор и анализ самых различных форм статистической информации, с взаимодействием с другими подразделениями для удовлетворения их требований к представляемой информации. Эта же служба должна иметь группу инженеров-электронщиков и системных инженеров, ответственных за проверку качества проектирования и документацию и поддержку в условиях эксплуатации. Другой подход к независимому сбору статистических данных и их централизованной обработке вряд ли будет столь же успешным.

Основной трудностью в стремлении улучшить качество продукции путем тщательного анализа всех статистических данных остается стоимость затраченных усилий. Тем не менее, как показано в гл. 2, стоимость системы низкого качества может увеличиться втрое за счет запасных частей и стоимости обслуживания по сравнению с системой хорошего качества.

С развитием технологий больших ИМС (БИС) вопросы гарантии качества и анализа отказов становятся еще более сложными. При построении систем на БИС одной из основных задач гарантии качества становится контроль времени переключения компонентов, модулей, блоков и систем. При анализе отказов следует учитывать ограничения применяемой технологии, например появление сбоев от воздействия α -частиц вследствие естественной радиоактивности корпуса микросхемы. В частности, это одна из причин сбоев в работе МОП-памяти, о которых уже упоминалось. Заметим, что некоторые из испытательных процедур, рассмотренных в этой главе, вводятся для борьбы с такими отказами, причины которых до конца не выяснены.

Глава 4

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

Влияние окружающей среды

Как правило, надежность электронных изделий уменьшается с повышением температуры. Например, надежность ИМС зависит от внутренней температуры переходов, которая в свою очередь зависит от окружающей температуры, теплового сопротивления ИМС, их типа, сложности и характера применения. Интегральные микросхемы спроектированы для работы в широком диапазоне температур, например от 0 до 80°C , но, как показывают расчеты, приведенные в справочнике Military Handbook 217 В, превышение рабочего диапазона температур, которое возможно внутри стойки ЭВМ, может уменьшить безотказность в 1,5 раза. Другие, менее изученные факторы, такие как включение и выключение питания, быстрые изменения температуры или воздушные турбулентности внутри стойки ЭВМ, также могут

уменьшать безотказность. Последние при наличии компонентов, работающих при граничных значениях своих параметров, могут вызывать многочисленные перемежающиеся отказы и сбои. Температурные изменения могут уменьшать область устойчивой работы и нарушать настройку периферийного оборудования.

При низкой относительной влажности возникающие статические разряды между оборудованием и персоналом могут искажать записанные в памяти данные и даже разрушать электронные компоненты. При высокой влажности влага может проникнуть через неплотности сварки в корпусе компонента и вызвать внутреннюю или внешнюю коррозию. Подобные проблемы возникают и в периферийном оборудовании.

Загрязнение воздуха может вызвать засорение фильтров и охлаждающих трубок, что ведет к повышению температуры. Такое загрязнение, как двуокись серы, вызывает коррозию и, следовательно, уменьшение безотказности и срока жизни. Некоторые периферийные устройства, например магнитные приборы, особенно чувствительны к пыли, которая вызывает разрушение данных или физическое повреждение запоминающей среды.

Поэтому нет ничего удивительного в том, что большинство изготавителей требует установки воздушных кондиционеров для больших систем.

Подробное изучение спецификаций и рекомендаций по окружающей среде показывает, что некоторые изготавители предъявляют по сравнению с другими более жесткие требования, что, по-видимому, свидетельствует о трудностях учета при проектировании более широких допусков на условия окружающей среды.

Условия в помещении для средних и больших систем

Температура и относительная влажность. Поставщики средних и больших систем требуют довольно жестких значений на колебания температуры и относительной влажности внутри помещения. Эти значения обычно заключены в диапазонах:

	Температура, °C	Относительная влажность, %
Худший случай	21 ± 1	50 ± 5
Лучший случай	21 ± 3	50 ± 5

Столь строгие требования иногда даются только для разработки кондиционеров для помещения, где установлена ЭВМ. Предполагается, что соблюдение этих требований гарантирует, что ограничения по температуре и влажности, наложенные при проектировании ЭВМ, не будут нарушены. Но известны случаи, когда указанные условия должны строго выполняться.

Интенсивность изменения окружающих условий. Помимо упомянутых выше спецификаций и рекомендаций часто приводятся данные по допустимой интенсивности изменения условий и иногда на допустимую максимальную разность температур в помещении:

Максимальная интенсивность изменений	Максимальная разность температур, °C
температуры, °C/ч 3–11	относительной влажности, %/ч 10–20

Условия для отключенной ЭВМ. Каждый производитель ЭВМ указывает свои требования к окружающим условиям для отключенной ЭВМ в диапазонах от нормальных условий, указанных в технических условиях до менее жестких условий с допустимым изменением температуры от 0 до 40°C и относительной влажностью от 10 до 90% с учетом допустимой скорости изменения температуры и относительной влажности.

Очистка воздуха. Большинство производителей больших систем согласно стандартам требуют очистки воздуха с 95%-ной эффективностью для частиц размером от 2 до 5 мкм. Однако при высоком уровне загрязнений наружного воздуха такой очистки может оказаться недостаточно. Поэтому целесообразно устанавливать допустимый уровень загрязнения воздуха в помещении вычислительного центра. Можно указать три диапазона чистоты воздуха (число частиц в 1 м³ воздуха), необходимой для работы оборудования различного назначения:

Размер частиц, мкм	Диапазон A	Диапазон B	Диапазон C
0,5–1	$1 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^7$
1–5	$1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$
Свыше 5	$1 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$

Условия в помещении для мини-ЭВМ и малых систем базовой конфигурации

Поставщики мини-ЭВМ обычно не требуют установки кондиционеров и предполагают либо нормальные комнатные условия, либо условия, записанные в спецификации на поставляемое оборудование. Но нормальные условия означают, что они приемлемы для людей, и потому обычно требуется охлаждение помещения. Более того, удовлетворение заданных в спецификации условий может потребовать установки кондиционера. Как показано ниже, мини-ЭВМ не являются исключением из общего правила — с изменением окружающих условий их надежность падает, но, однако, это часто допустимо из-за низкой стоимости компонентов. Необходимость в кондиционировании определяется также временем, которое пользователь согласен потерять при простоях из-за недопустимых для людей или машин условий в помещении.

Наиболее разнообразие в требованиях к окружающим условиям предъявляют поставщики малых систем базовой конфигурации. Их требования могут изменяться от "нормальных комнатных" до очень жестких, какие обычно выдвигаются для больших систем.

Требования к окружающим условиям при проектировании

Требования к окружающим условиям по температуре и относительной влажности обычно даются в спецификации на проектирование тех или иных устройств и по сравнению с требованиями к окружающим условиям в помещении имеют довольно широкие границы. Как правило, для каждого типа устройств имеется своя спецификация, но иногда спецификация дается сразу на всю систему. Изучение спецификаций может пролить свет на слабые места проектирования, где надежность существенно зависит от окружающих условий.

На рис. 4.1 приведены диаграммы допустимых отклонений температуры и относительной влажности для центральных процессоров и периферийных устройств больших вычислительных систем базовой конфигурации. Для сравнения здесь же показаны допустимые изменения этих условий в помещении. На рис. 4.2 приведены аналогичные данные для малых вычислительных систем и мини-ЭВМ.

Средние и большие процессоры

Спецификации по температуре для больших и средних процессоров задают диапазоны от 10–38 до 17–23°C. Интересно отметить, что система с широким температурным диапазоном, как правило, и самая надежная, а с узкими — самая ненадежная. Последнее связано с общим числом компонентов в системе, и можно видеть, что самые большие процессоры, будучи наименее надежными, (см. рис. 4.1) имеют самый узкий температурный диапазон. Это, конечно, удивительный факт — казалось

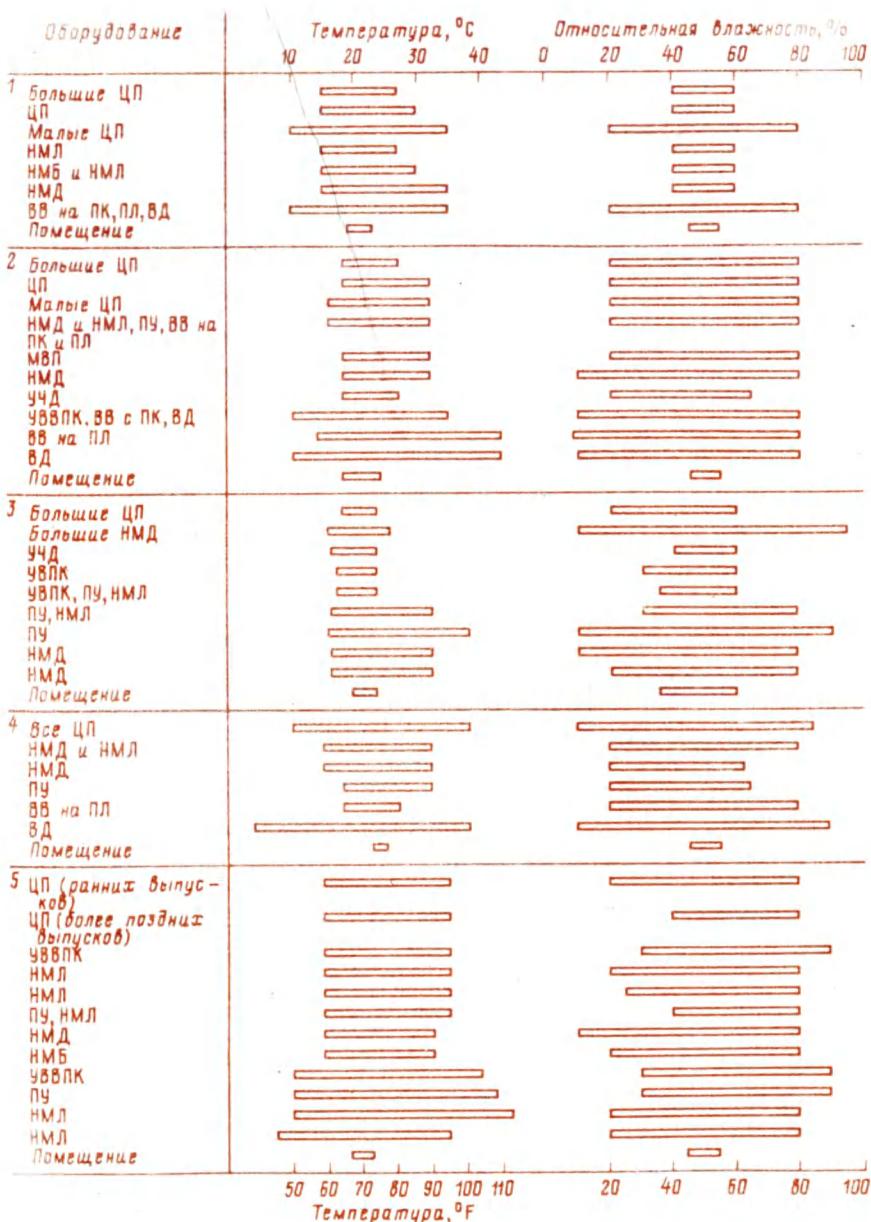


Рис. 4.1. Условия по температуре и относительной влажности для средних и больших систем:

ЦП – центральный процессор; НМЛ – накопитель на магнитных лентах; НМД – накопитель на магнитных дисках; НМБ – накопитель на магнитных барабанах; ВВ – устройство ввода-вывода; ПК – перфокарта; ПЛ – перфолента; ВД – видеодисплей; ПУ – печатающее устройство; МВП – магнитный ввод с перфокарт; УЧД – устройство чтения документов; УВВПК – устройство ввода с перфокарт; УВПК –

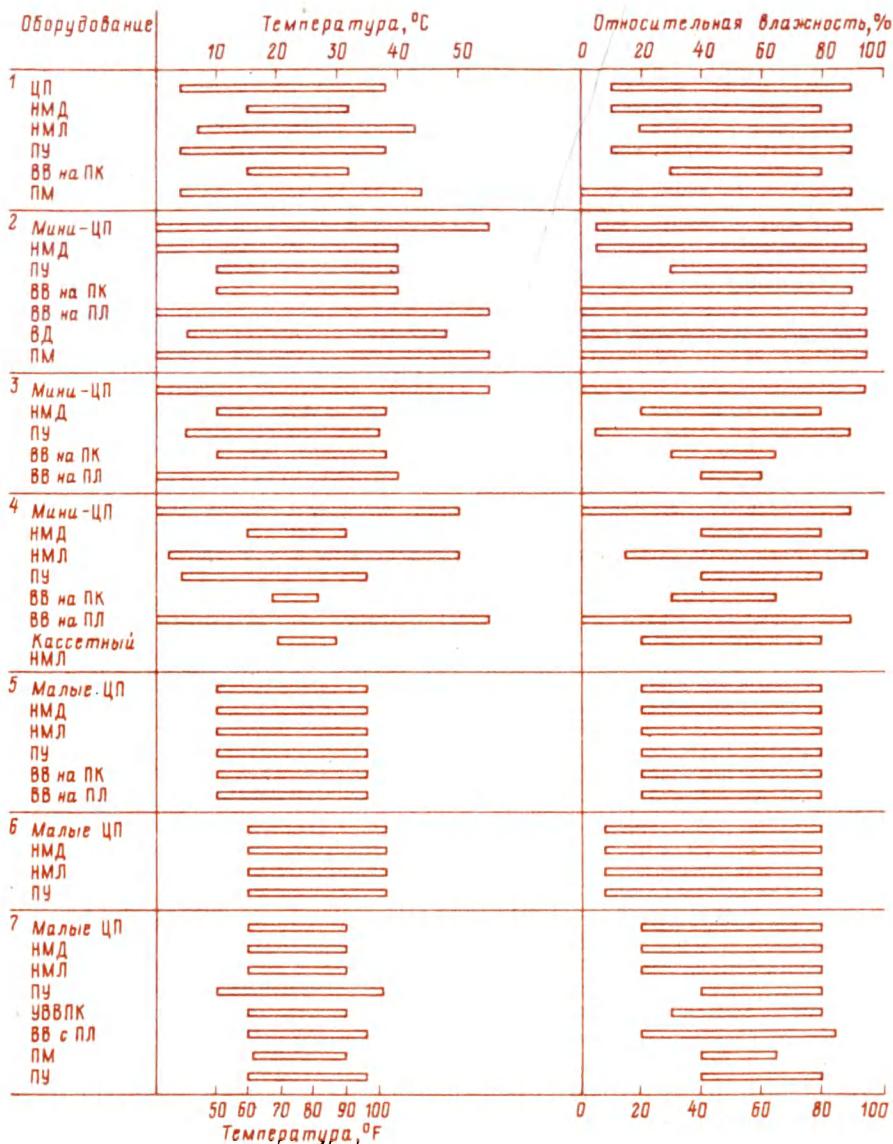


Рис. 4.2. Условия по температуре и относительной влажности для малых мини-систем:

ПМ – пишущая машинка

бы, что машины с водяным охлаждением должны быть нечувствительными к условиям в помещении, но на самом деле подобного не происходит.

Один из изготовителей приводит при проектировании ограничения на относительную влажность для некоторых процессоров в диапазоне 40–60% (см. рис. 4.1). Скорее всего, это для самоуспокоения. Там же указаны процессоры, требующие относительной влажности выше 40%. Оказывается, это процессоры того изгото-

теля, у которого ранее встречались трудности из-за статического электричества, вызывавшего повреждения в системе. Для других процессоров требуется не выше 60% относительной влажности – это следствие того, что в более ранней продукции возникали отказы от проникновения влаги через корпуса диодов.

По-видимому, можно заключить, что жесткие граничные условия при проектировании появляются в следующих двух случаях:

1) как предосторожность, особенно для больших систем, которые наименее надежны;

2) когда на предыдущих или новых моделях обнаруживается сильная зависимость надежности от окружающих условий. В этом случае следует найти новые проектные решения, чтобы ослабить требования к окружающим условиям.

Малые ЭВМ и микропроцессоры

Малые ЭВМ и микропроцессоры обычно допускают следующие диапазоны окружающих условий:

Тип устройства	Температура, °C		Относительная влажность, %	
	Лучший случай	Худший случай	Лучший случай	Худший случай
Малые ЭВМ	10–35	15–32	8–80	20–80
Микропроцессоры	0–55	4–38	0–95	20–80

Если требования по отводу тепла не очень жесткие, то вышеприведенные диапазоны внешних условий можно обеспечить и без кондиционирования помещения. Тем не менее некоторые малые ЭВМ могут требовать влажности не ниже 40%, а для этого приходится делать искусственное увлажнение воздуха.

Типичные требования для микропроцессорных систем такие же, как и для лучших малых ЭВМ, но и некоторые из них требуют температуры не выше 40°C и относительной влажности не выше 90%.

Периферийные устройства больших систем

Накопители на сменных магнитных дисках. Согласно данным для больших систем, приведенным на рис. 4.1, накопители на сменных дисках требуют температурных условий в диапазоне 15–32°C и относительной влажности 20–80% с небольшими вариациями для разных систем. Некоторые из приведенных систем, имея одного и того же изготовителя НМД, тем не менее имеют различные требования к накопителям, выдвигаемые поставщиками этих систем.

Температура и влажность для отключенных накопителей на сменных дисках изменяются в диапазонах от 15–32°C, 5–95% влажности или 10–44°C, 8–80% влажности до $-40 \div +60^\circ\text{C}$, 0–95% влажности с условием, чтобы во всех этих случаях не достигалась точка росы.

Обычно НМД снабжаются двухступенчатыми воздушными фильтрами, очищающими воздух от частиц пыли размерами более 0,3 мкм, поэтому основное требование – не допустить загрязнения пакетов дисков при хранении и установке в систему. Пакеты дисков имеют встроенный фильтр в основании пакета, через который проходит воздух при установке и работе дисков. Пользователь должен регулярно менять этот фильтр.

Иногда заявляют, что указанные условия для НМД диктуются свойствами носителей. Для пакетов дисков это, по-видимому, не так. Типичные значения температуры и влажности при их работе составляют 15–48°C и 8–80%. Условия хранения дисков обычно задаются границами $-40 \div +65^\circ\text{C}$ и 8–80% влажности при условии отсутствия конденсации влаги (в течение по меньшей мере 5 лет). При изменении окружающих условий при переходе от хранения дисков к их работе обычно требуется 2-часовая выдержка в новых условиях.

Накопители на магнитных лентах. Задаваемые при проектировании требования по температуре и влажности для НМЛ более разнообразны, чем для НМД. Наиболее широкий диапазон этих требований 15–32°C температуры и 20–80% влажности для накопителей с высокой плотностью записи и высокой скоростью протяжки. Тем не менее один из поставщиков, имевших в прошлом трудности с обеспечением надежности работы НМЛ, ограничил диапазоны до 17–23°C и 35–60% влажности. Некоторые поставщики, возможно, и не имевшие ранее подобных проблем, ограничили предел относительной влажности до 60 и даже до 40%.

Принято считать, что на НМЛ оказывает сильное влияние пыль в помещении (следует заметить, что эти устройства могут быть чувствительны к собственной пыли, порождаемой разрушением поверхности ленты). С учетом этого требования к загрязнению воздуха в помещении обычно определяются соответствующими требованиями к таким накопителям. Следующие примеры спецификаций показывают разнообразие задаваемых требований по хранению магнитных лент.

Спецификация	Температура, °C	Относительная влажность, %
A	4,5–32	20–80 (максимальная интенсивность изменения 10°C и 10% в час)
B	4–32	20–80
C	10–32	20–80 (для длительного хранения)
D	16–25	35–60
E	15–27	40–60
F	5–32	30–80 (для перевозки)
G	4–32	20–80
H	4–49	20–80 (без записи)
I	4–32	20–80 (с записью)
J	0–50	10–80

Требования к выдержке в заданных условиях после хранения обычно даются в пределах 6 ч, но есть поставщики, требующие 4–16 и даже 24 ч.

Спецификации, выдвигаемые производителем, для рабочих условий изменяются, по-видимому, в пределах 4–32÷15–32°C по температуре и 20–80÷30–80% по влажности. Эти условия более жестки, чем условия хранения лент. Как и для дисков, некоторые из ограничений на условия работы НМЛ нельзя оправдать свойствами носителей.

Накопители на магнитных лентах кассетного типа имеют более широкие диапазоны с типичными значениями 10–40°C и 20–80% влажности для условий применения и –30÷+70°C и 10–90% влажности при отключенном состоянии.

Печатающие устройства, устройства ввода и вывода на перфокарты и перфоленту. Для некоторых из этих устройств существуют довольно жесткие ограничения на окружающие условия, особенно по относительной влажности (см. рис. 4.1).

Общие требования к условиям их работы диктуются свойствами носителей, и действительно, спецификации на перфокарты или перфоленты, можно сказать, определяют требования к условиям в помещении. Обычно это 18–24°C и 40–60% относительной влажности.

Периферийные устройства мини- и микро-ЭВМ

Мини-ЭВМ. Как и для больших систем, проектные требования к окружающим условиям работы периферийного оборудования мини-ЭВМ отражают те трудности, с которыми сталкивается каждый производитель определенного типа устройств.

Иногда одни и те же устройства, используемые различными поставщиками, имеют сильно отличающиеся спецификации на окружающие условия, но чаще эти спецификации совпадают с теми, которые задает производитель периферийного

оборудования. Примеры спецификации на температурные условия и относительную влажность окружающей среды для малых вычислительных систем и мини-ЭВМ приведены на рис. 4.2 и имеют следующие границы

Тип устройства	Температура, °С		Относительная влажность, %	
	Лучший случай	Худший случай	Лучший случай	Худший случай
НМД	0–40	15–32	0–95	40–70
НМЛ	2–50	10–30	6–95	40–70
Оборудование для перфокарт	0–50	19–26	0–90	30–60
Оборудование для перфоленты	0–55	10–35	0–95	40–60
Печатающие устройства	4–38	16–32	3–90	40–80

Приведенные значения показывают, что, по-видимому, различные производители имеют свои специфические проблемы с каждым типом периферийных устройств, особенно по относительной влажности, и, чтобы выдержать эти требования, в некоторых случаях необходима установка кондиционеров.

Микро-ЭВМ. Микропроцессорные системы могут иметь встроенные периферийные устройства, такие как кассетный накопитель, диски и визуальные дисплеи, для которых требования к окружающим условиям близки к требованиям для мини-ЭВМ. Другие микросистемы могут использовать те же периферийные устройства, что и мини-ЭВМ.

РАССЕИВАНИЕ ТЕПЛА И ТРЕБОВАНИЯ К РАЗМЕЩЕНИЮ

В табл. 4.1 приведены данные по рассеиванию тепла и размещению для ряда больших и средних вычислительных систем базовой конфигурации, поставляемых различными производителями.

Процессоры

Для одного и того же типа электронных устройств существует много различных способов теплоотвода. Процессоры с одинаковой скоростью могут различаться в 5 раз по рассеиваемой мощности; причины этого следующие.

1. **Технология.** Процессоры с одинаковыми характеристиками и быстродействием могут быть построены на различных технологиях, например ЭСЛ или ТТЛ или с использованием той и другой технологии. Однако рассеивание тепла одной ЭСЛ ИМС примерно в 4 раза превышает рассеивание ТТЛ ИМС. В табл. 4.2 показаны соотношения между характеристиками: технология – рассеивание – быстродействие для различных процессоров, построенных на технологии ЭСЛ, ТТЛ или с применением обеих этих технологий. В таблице приведены данные по удельному рассеиванию тепла на одну ИМС, подсчитанные для каждого процессора с учетом тепла от других компонентов, вентиляторов и источников питания, а также среднее значение по рассеиванию тепла собственно ИМС (последний столбец). Можно утверждать, что лишь одна пятая всей рассеиваемой мощности приходится на долю ИМС. Степень интеграции может оказывать большое влияние на общую рассеиваемую мощность, когда рассеиваемая мощность не обязательно растет пропорционально увеличению сложности ИМС. Процессор 2 (см. табл. 4.2), использующий БИС, подтверждает это; несмотря на то что рассеивание одной ИМС значительно превышает остальные случаи, общее рассеивание тепла сравнительно меньше.

Проектируя ЭВМ, желательно иметь несколько вариантов с различными мощностями рассеивания. Например, для процессора 5, использующего ЭСЛ-технологию, правила предпочтения выбора того или иного варианта рекомендовали выбирать

Таблица 4.1. Рассеивание тепла и требования к размещению

Процессоры с быстродействием, тыс. команд/с	№ ЭВМ	Рассеиваемое тепло, кВт				Общий воздушный поток, м ³ /с	Примерная минимальная площадь помещения, м ²
		Центральный процессор, память, каналы, контроллеры, пульты управления	6 НМД	4 НМЛ	Устройство ввода с перфокарт, печатающее устройство		
Сверхбольшие 4000–8000	1	40 (воздухом) 41 (водой)	6,3	7,6	6,2	60,1 (воздухом) 101,1 (общее)	7,0 190
	2	40 (воздухом) 100 (водой)	8,4	14,8	7,0	70,2 (воздухом) 170,2 (общее)	160
Большие 1500–4000	3	34,6	6,3	7,6	6,2	54,7	130
	1	27,3 (воздухом) 27,5 (водой)	6,3	7,6	6,2	47,4 (воздухом) 74,9 (общее)	5,07 170
	2	44	8,4	16,0	6,2	74,6	7,16 170
Средние (большие) 600–1500	3	47,8	9,1	6,0	4,9	67,8	7,75 180
	1	29,5	8,4	16,0	6,2	60,1	5,45 150
	2	27,1	6,3	7,6	6,2	47,2	4,17 120
	3	18,7* (воздухом) 58,8 (водой)	8,1	6,0	4,6	37,4 (воздухом) 82,7 (общее)	3,63 180
	4	5,5 (воздухом) 10,4 (водой)	8,4	14,8	7,0	35,7 (воздухом) 46,1 (общее)	3,63 180
Средние 250–600	5	10,9	8,4	5,2	5,0	29,5	120
	6	16,9	9,1	6,0	4,9	36,9	5,0 120
	7	15,2	6,2	5,0	2,8	29,2	100
	1	20,0	8,0	6,0	3,3	37,3	120
	2	12,5	6,2	5,0	2,8	26,5	100
	3	14,7	8,4	6,3	6,2	35,6	120
	4	11,7	8,1	6,0	4,6	30,4	4,38 120
	5	24,0	6,3	7,6	6,2	44,1	3,9 120

* При открытых дверях.

Таблица 4.2. Число ИМС, быстродействие и рассеивание тепла для средних и больших систем базовых конфигураций (без учета памяти)

Процессор	Число ИМС, тыс. шт.	Быстродействие, тыс. команд/с	Общая рассеиваемая мощность, кВт	Мощность на 1 ИМС, Вт	Средняя мощность, рассеиваемая 1 ИМС, Вт
1	44,0	5000	37,1	0,84	0,35
2	2,0 БИС	4000	19,0	9,5	2,0
3	24,0	2500	21,8	0,91	0,17
4	5,0	1200	9,0	1,8	0,15
5	14,0	1200	9,0	0,64	0,18
6	13,0	1000	31,0	2,38	0,50
7	26,4	900	4,8	0,18	0,04
8	11,6	800	9,4	0,81	0,15
9	37,8	600	15,6	0,41	0,10
10	18,0	450	12,2	0,67	0,10
11	10,0	350	3,0	0,30	0,04
12	8,0	200	2,2	0,27	0,04

вариант с малой рассеиваемой мощностью всякий раз, когда это возможно. Несомненно, это одна из причин низкой рассеиваемой мощности на одну ИМС по сравнению с процессорами 3, 4, 8, построенными в основном на той же элементной базе.

2. *Архитектура.* Все ЭВМ одинакового быстродействия имеют неодинаковые аппаратурные решения, в некоторых случаях различные возможности ЭВМ реализуются с помощью программного обеспечения, что снижает общую производительность, но не обязательно ведет к снижению потребляемой мощности. Кроме того, разное число (10–40%) всех применяемых компонентов предусматривается для целей обслуживания системы.

3. *Охлаждение и источники питания.* Вентиляторы и другое оборудование для охлаждения, а также источники питания могут выделять 2/3 всего тепла, рассеиваемого системой. Например, в процессоре 6 логические схемы, источники питания и устройство для охлаждения выделяют по 10 кВт каждое. В некоторых случаях эти значения могут быть больше, как в процессоре 4, где ряд регуляторов источников питания выделяет значительную мощность. Следует заметить, что многие наиболее быстродействующие процессоры имеют встроенное водяное охлаждение, которое облегчает требования к охлаждению помещения, но увеличивает стоимость системы. Особый интерес представляет процессор 2, построенный на БИС (см. табл. 4.2). По-видимому, им определяются в будущем требования к ЭВМ других производителей, поскольку им рассеивается 5 кВт на 1 м². Это почти вдвое выше, чем для остальных систем с большим рассеиванием и с воздушным охлаждением.

Безотказность и рассеивание тепла

На рис. 4.3 приведена зависимость безотказности ряда средних и больших процессоров от рассеиваемой мощности. Для процессоров указано их быстродействие. На рис. 4.3 отражается различие в рассеивании тепла процессорами с одинаковой производительностью, хотя общая тенденция увеличения интенсивности отказов с увеличением рассеиваемой мощности хорошо выражена.

Проследим далее зависимость безотказности процессоров от рассеиваемой мощности, взяв за основу удельное рассеивание на одну ИМС (см. табл. 4.2) при воздушном охлаждении и показатель безотказности (см. гл. 3):

Таблица. Показатель безотказности

Число отказов за 1000 ч на 1000 ИМС	Число событий за 1000 ч на 1000 ИМС	Рассеиваемая мощность на 1 ИМС, Вт
0,21	2,8	2,38
0,10	1,35	0,67
0,077	0,67	0,30

Продолжение табл.

Число отказов за 1000 ч на 1000 ИМС	Число событий за 1000 ч на 1000 ИМС	Рассеиваемая мощность на 1 ИМС, Вт
0,026	0,11	0,27
0,022	0,05	0,18
0,007	0,05	0,41

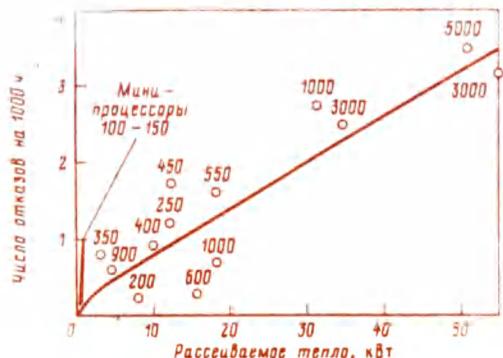


Рис. 4.3. Зависимость безотказности от рассеивания тепла для средних и больших систем базовых конфигураций, включая каналы ввода-вывода, но исключая память

Как видно из таблицы, интенсивность отказов увеличивается с ростом рассеиваемого тепла (исключение – последняя строка). Хотя эту тенденцию можно было предвидеть из технологических характеристик различных процессоров и различной организации воздушного охлаждения, но трудно было ожидать столь значительных влияний. Интенсивности событий изменяются в широких пределах, и хотя тут оказывают влияние другие причины, характеризующие обслуживаемость системы, все же число событий на один отказ растет с увеличением рассеиваемой мощности (даже для системы, попавшей в исключение). Таким образом, повышение рассеиваемой мощности приводит помимо уменьшения безотказности к изменению характера самого отказа, смешая его в область перемежающихся отказов.

Для ЭВМ с жидкостным охлаждением, подведенным непосредственно к модулям (что обеспечивает более целенаправленное охлаждение), можно наблюдать четырехкратное и даже большее улучшение показателя безотказности при данной рассеиваемой мощности на интегральную микросхему одной и той же технологии и улучшение показателя числа событий на отказ при одинаковых условиях обслуживания.

Однако для мини-ЭВМ показатель безотказности, по-видимому, может быть по меньшей мере в 4 раза меньше при одном и том же рассеивании на ИМС. Для большинства процессоров мини-ЭВМ эти значения лежат в диапазоне от 0,5 до 1 Вт на ИМС и показатель безотказности лежит между 0,2 и 1 отказом за 1000 ч на 1000 ИМС. Характеристики безотказности процессоров мини-ЭВМ, отличающихся разными быстродействием, приведены на рис. 4.3. Видна слабая зависимость безотказности от общей рассеиваемой мощности. Тем не менее и здесь наблюдается значительное изменение безотказности с ростом рассеиваемой мощности на ИМС. Прогнозы, основанные на учете технологии и характеристик воздушного охлаждения, и в этом случае не смогли бы предсказать столь значительного диапазона изменений безотказности.

Следует отметить еще одну специфическую трудность в охлаждении мини-ЭВМ, для которых имеется тенденция размещения их в небольших комнатах. Эта трудность состоит в том, что все тепло рассеивается в объеме комнаты. Для мини-ЭВМ отвод тепла обычно достигает $3-15 \text{ кВт}/\text{м}^3$ по сравнению с $0,5-5 \text{ кВт}/\text{м}^3$ для большинства ЭВМ базовых конфигураций с воздушным охлаждением.

КОНТРОЛЛЕРЫ ПЕРИФЕРИЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ГЛАВНАЯ ПАМЯТЬ

Контроллеры периферийного оборудования и главная память обнаруживают такие же зависимости от рассеивания тепла, как и упоминавшиеся в начале данного раздела. Рассеивание тепла для ЗУ на магнитных сердечниках почти вдвое превышает его для МОП-памяти такой же емкости, но МОП-память занимает меньший объем. Рассеивание тепла для МОП-памяти, использующей одинаковые ИМС, может различаться в 3 раза (например, для памяти емкостью 128 Кбайт от 0,28 до 0,97 кВт) – это один из факторов, затрудняющих управление памятью.

Периферийные устройства систем базовых конфигураций

Для малых конфигураций системы, отраженных в табл. 4.1, рассеивание тепла, приходящееся на периферийные устройства, составляет от 0,3 до 0,6 общего рассеивания с широким диапазоном изменений для разных типов устройств.

Для НМЛ одинакового быстродействия у одного поставщика рассеиваемая мощность вдвое выше, чем у другого. Данные в табл. 4.1 приведены для режима движения ленты; эти данные обычно несколько меньше для режима неподвижной ленты. В предположении, что несколько накопителей в помещении работают одновременно, для одного из их типов рассеивание достигает 8 кВт/м², что значительно больше, чем для процессора на БИС, упоминавшегося ранее. Накопители на сменных магнитных дисках обычно рассеивают меньше тепла, чем НМЛ, но для различных типов НМД эти значения также сильно различаются.

Общее рассеивание тепла системами базовых конфигураций

Из данных в табл. 4.1 видно, что общее рассеивание тепла в помещении изменяется от 0,2 до 0,44 кВт/м². Периферийное оборудование согласно табл. 4.1 занимает 70 м², и среднее значение рассеиваемого им тепла совпадает с этим значением для всей системы – от 0,2 до 0,44 кВт/м². Электронная аппаратура дает более широкий разброс – от 0,11 до 0,57 кВт/м², где нижняя граница достигается для процессора с водяным охлаждением.

Одна из главных проблем при проектировании систем кондиционирования, обеспечивающих равномерное распределение температуры в помещении, заключается в объемах и скоростях воздуха, подаваемого на обдув оборудования, обычно это требует более высоких потолков, чем стандартные. В табл. 4.1 приведены необходимые объемы расходуемого для охлаждения воздуха в кубических метрах в секунду; эти значения меняются в довольно широких пределах. При плохом проектировании систем кондиционирования и недостаточном объеме помещения для систем, требующих высокого расхода охлаждающего воздуха, могут возникнуть дополнительные трудности с обеспечением их безотказности.

Рассеивание тепла и размещение малых и мини-систем

Типичные значения рассеиваемого тепла для малых систем базовой конфигурации и мини-систем следующие:

Устройства, входящие в базовую конфигурацию системы	Малые системы, кВт	Мини-системы, кВт
Процессор	2,0–5,0	0,5–2,5
НМД	0,3–1,5	0,3–1,5
НМЛ	0,6–1,8	0,2–1,3
Устройство считывания с перфокарт	0,5–2,5	0,2–2,0
Печатающее устройство	0,7–4,0	0,3–2,0
Перфоратор и устройство ввода с перфоленты	0,5–2,0	0,2–1,0
Печатающая машинка и пульт управления	0,1–1,0	0,1–0,3

Следует заметить, что встречаются мини-процессоры с малой рассеиваемой мощностью до 150 Вт и некоторые малые процессоры с тем же показателем, превышающим 10 кВт.

Типичные значения рассеиваемой мощности и занимаемой площади для мини- и малых систем лежат в следующих границах:

Удельные рассеивания мощности для мини-систем и малых систем базовой конфигурации близки друг к другу и изменяются в диапазоне 0,13–0,44 и 0,12–0,42 кВт/м² соответственно. Нижние границы этих диапазонов почти вдвое меньше, чем для больших систем, однако верхние границы сопоставимы; это означает, что проблемы кондиционирования здесь такие же, как и для больших систем.

Рассеивание тепла и размещение микропроцессорных систем

Платы микропроцессоров рассеивают обычно от 10 до 50 Вт, однако весь процессор может рассеивать от 50 до 250 Вт с учетом источников питания, вентиляторов, дополнительной памяти и контроллеров устройств ввода-вывода. Небольшая персональная настольная микропроцессорная система со встроенным видеотерминалом, кассетным накопителем и клавиатурой может рассеивать минимум 150 Вт. При нескольких таких системах в одном помещении при 2 м² площади на каждую из них общее удельное рассеивание может достигать 0,075 кВт/м². В другом краине случае, когда периферийное оборудование такое же, как и для мини-ЭВМ, это рассеивание может достигнуть 0,3 кВт/м².

НЕОБХОДИМОСТЬ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

При решении вопроса о необходимости установки кондиционера для помещения с ЭВМ, включая мини- и даже микро-ЭВМ, главный критерий, на который должен ориентироваться пользователь, – это сколько времени он готов потерять из-за:

1) низкой надежности системы;

2) отключения оборудования, если окружающие условия становятся неприемлемыми для обслуживающего персонала или выходят за пределы спецификаций на оборудование.

Надежность понижается из-за неблагоприятных окружающих условий, однако для малых или мини-ЭВМ малых конфигураций эта надежность может оказаться еще приемлемой. Например, для типичной основной конфигурации мини-ЭВМ, упомянутой выше, в хороших окружающих условиях может быть менее двух отказов за год, а в плохих окружающих условиях это значение не превысит одного отказа за 2 мес. Для больших же систем, у которых более одного серьезного отказа в ме-

Вид конфигурации системы	Устройства, входящие в конфигурацию системы	Рассеиваемая мощность, кВт	Минимальная занимаемая площадь, м ²
Основная мини-конфигурация	Центральный процессор, устройство ввода и вывода на перфоленту	1–3	7,5
Более типичная основная мини-конфигурация	То же и НМД	1,5–4	9,0
Более крупная мини-конфигурация	То же и НМЛ, устройство ввода с перфокарт и пишущая машина	3–6	20,0
Базовая конфигурация малых систем	Центральный процессор, устройство ввода с перфокарт, печатающее устройство, НМД, пульт управления	3–8	25,0
Типовая конфигурация малых систем	То же, два НМД и два НМЛ	6–15	36,0

сяц, по-видимому, только установка кондиционера может обеспечить потребителю надежную работу системы.

При отсутствии какого-либо кондиционирования температура и относительная влажность в помещении зависят от наружных условий, конструкции здания, его расположения и ориентации, размеров помещения и источников тепла внутри него. Приступая к рассмотрению необходимости введения кондиционирования, обычно рассчитывают на летний период с максимальным солнечным излучением. В этом случае сравнительно легко показать, что кондиционер необходим. Однако если ориентироваться на средние значения летних температур, то можно показать, что кондиционер необязателен. Истина, как обычно, где-то между этими решениями.

В любом помещении с электрическим оборудованием почти наверняка будут моменты, когда слишком жарко для людей или возможен перегрев оборудования и приходится отключать часть оборудования. При отсутствии кондиционеров возможны случаи отключения оборудования из-за чрезмерной сухости или, наоборот, сырости в помещениях.

Рассеивание тепла и максимально допустимая температура

Для любого помещения необходимо оценить ожидаемый разброс температуры в течение года или вычертить график, показывающий долю времени в течение года, когда температура превышает возможности рассеивания тепла в помещении. На рис. 4.4 приведен подобный график для помещения, выходящего окнами на северную сторону, в современном здании облегченной конструкции Лондона при максимально допустимой температуре в помещении 30°C . Разные кривые соответствуют различным условиям — открытым или закрытым окнам, с затемнением помещения с помощью штор и с применением вентилятора. Лучший случай на рис. 4.4 соответствует опусканию штор и применению вытяжной вентиляции; последнее не всегда можно планировать заранее, так как вентиляция должна обеспечить 30-кратную смесь воздуха в помещении в течение 1 ч, что не всегда достижимо при приемлемых уровнях сквозняков и шума. Можно дать такой же график для температуры 27°C — иногда это значение считается максимально приемлемым для обслуживающего персонала.

Зависимость рассеиваемой в помещении мощности на рис. 4.4 не следует принимать как типовую, и при допустимом уровне простоя в 5% из-за превышения температуры в помещении можно пользоваться следующими средствами:

Средства управления температурой

Ниакаких (окна закрыты), kBt/m^2	0,05
При необходимости открыты окна, kBt/m^2	0,1
Механическая вентиляция, kBt/m^2	0,25

Максимально допустимое рассеивание тепла на 1 m^2

0,05
0,1
0,25

Рассеивание тепла для малых и мини-машин и для больших систем находятся в диапазонах от 0,12 до 0,44 и от 0,20 до 0,44 kBt/m^2 соответственно, и большинство из них нуждается по крайней мере в механической вентиляции помещения, чтобы уложиться в заданные требования. Ситуация может ухудшиться для помещений, выходящих на южную сторону, или для более низких допустимых

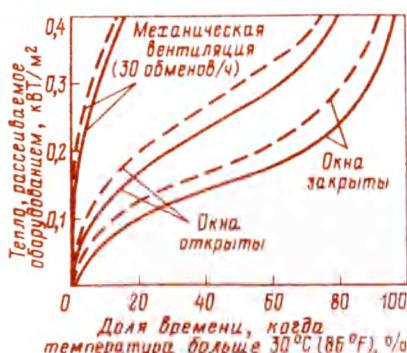


Рис. 4.4. Время пребывания ЭВМ при повышенной температуре в современном здании облегченной конструкции при отсутствии кондиционирования воздуха (окна, выходящие на север):

— — — лучший случай (наружные жалюзи на окнах)

температур; однако для зданий с хорошей теплоизоляцией ситуация может быть значительно лучшей. При рассеивании тепла выше $0,25 \text{ кВт}/\text{м}^2$ необходимо охлаждение воздуха, однако если речь идет лишь об управлении температурой в помещении, то заданные требования можно удовлетворить сравнительно недорогой холодильной установкой. Следует заметить, что все эти рассуждения справедливы для помещений минимально допустимого объема, где условия среды определяются тепловым рассеиванием электрических установок. Ясно, что одиночные системы с низким уровнем теплового рассеивания, как, например, микропроцессорная система, установленная в помещении подходящего объема, будут незначительно влиять на внешние условия в помещении.

Минимальная относительная влажность

В погодных условиях Великобритании некондиционируемое помещение, в котором находятся несколько человек имеет относительную влажность менее 30% в течение 25% времени года при внутренней температуре в помещении 21°C . В течение 6% времени относительная влажность может падать до 20%. Эти значения соответствуют периоду от декабря до марта. При наличии холодильной установки влажность воздуха уменьшается. Ясно, что с повышением температуры сверх 21°C относительная влажность также снижается.

Все производители больших систем (см. рис. 4.1) дают в технических условиях на аппаратуру нижний предел относительной влажности 20%, поэтому необходимо увлажнение воздуха, чтобы удовлетворить этим требованиям. При отсутствии необходимого увлажнения можно ожидать следующих неприятностей:

- 1) разрушения информации или физического разрушения электронных компонентов, вызываемого разрядами статического электричества. Иногда необходимо обратить внимание на облицовку пола и мебели, чтобы уменьшить опасность электрических разрядов. Сопротивление между полом и землей не должно превышать $2 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$; одновременно оно должно быть более $5 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ для безопасности персонала;
- 2) понижения влажности, что может вызвать скручивание магнитной ленты и других носителей, а также прилипание их к другим материалам из-за статического электричества.

Обе эти причины могут привести к нарушениям свободного перемещения носителей или к нарушениям считывания информации, а в отдельных случаях – к разрушению оборудования.

На малых и мини-системах (см. рис. 4.2) для некоторых устройств нижняя граница допустимой относительной влажности составляет 20% или выше. Поэтому, чтобы избежать неприятностей, связанных с нарушением технических условий, приходится эту часть оборудования на время отключать. Более того, если даже оборудование отключается при неблагоприятных окружающих условиях, не удовлетворяющих спецификациям, оптимальный уровень безотказности и обслуживаемости вряд ли может быть достигнут без применения увлажнителя воздуха. Если удовлетворение требований для конкретного проекта гарантируется, то можно ограничиться установкой недорогого комнатного увлажнителя.

Максимальная относительная влажность

Для погодных условий Великобритании в некондиционируемом помещении с температурой 21°C можно ожидать относительной влажности более 60, 70 или 80% в течение соответственно 11, 3 и 1% общего времени работы, главным образом в период от июня по октябрь. Поскольку применение охлаждения в этот период почти неизбежно, то излишняя влага будет удаляться из воздуха и относительная влажность понизится до 60% в течение почти всего указанного времени. Если при этом нет кондиционирования, то в солнечных помещениях относительная влажность обычно не превышает 70%.

Производители машин базовых конфигураций и мини-ЭВМ обычно задают верхнее значение относительной влажности 80% для большинства устройств. Тем не менее встречаются исключения, требующие не выше 60% относительной влажности.

В этом случае необходимо осушение воздуха для удовлетворения требованиям спецификаций на некоторые устройства. Подобные же действия необходимы для удовлетворения требований к условиям применения носителей информации, в основном разнообразных сортов бумаги.

Безотказность и ожидаемое время жизни аппаратуры действительно падают с увеличением относительной влажности более 50%, однако в условиях Великобритании эта зависимость не так ярко выражена, как при понижении относительной влажности или повышении температуры. Если в течение большей части времени работы обеспечена относительная влажность не выше 70%, то при проектировании можно не учитывать изменения относительной влажности в пределах 50–70%. Однако нужно обратить внимание на вопросы акклиматизации носителей информации.

Осушение воздуха. Для осушения воздуха обычно следует понизить температуру до достижения точки росы (для 21°C и 50% относительной влажности точка росы 10,5 °C) и затем снова нагреть воздух до достижения желаемых условий. Для рекомендуемых при наличии кондиционера номинальных проектных пределов относительной влажности ($50 \pm 5\%$) стоимость дополнительной холодильной установки и эксплуатационные расходы по осушению воздуха могут быть значительными. Считается, что для малых и мини-ЭВМ лишь в исключительных случаях необходимо осушение воздуха. Для больших систем следует требовать от производителей достижения допустимого верхнего порога относительной влажности не менее 70% и гарантировать, что все устройства способны работать при относительной влажности 80% и выше.

Наиболее вероятный случай появления избыточной влажности связан с отключением системы и понижением температуры с выпадением конденсата. Появление такого конденсата возможно при применении кондиционера или при работе в зданиях облегченной конструкции. Обычный способ борьбы с этим явлением – применение вспомогательных обогревателей.

Пыль

Для небольших ЭВМ, работающих в помещении с закрытыми окнами, обычно не возникает проблем с загрязнением воздуха, однако если окна открыты или если применяется механическая вентиляция или холодильная установка, то вероятность появления пыли возрастает.

Для механических вентиляторов и холодильных установок проблема решается с помощью применения фильтров из поролона, если только атмосферный воздух не чрезмерно загрязнен.

Стоимость кондиционирования воздуха

Распространено ошибочное мнение, что установки кондиционирования воздуха стоят дороже, чем оборудование ЭВМ. В связи с сильной инфляцией последних лет стоимость ЭВМ и кондиционеров возросла значительно, но современная стоимость их приблизительно такова (для Великобритании) :

1. Малые и мини-ЭВМ. Комнатная установка для охлаждения, увлажнения и фильтрации – от 1,5 до 20% общей стоимости ЭВМ. Большие значения – для небольших мини-ЭВМ, с большим рассеиванием тепла и требованием постоянной готовности к работе и работающих в условиях повышенной солнечной радиации.

2. Средние и большие ЭВМ. Полное кондиционирование воздуха комнатными кондиционерами – от 1 до 5% стоимости всей системы.

3. Средние и большие ЭВМ. Полное кондиционирование воздуха центральной станцией через воздуховоды – от 2 до 7% стоимости всей системы.

В многих случаях использование кондиционеров оправдано, особенно если отклонение за пределы технических условий по температуре весьма вероятно в течение заметного интервала времени. При отсутствии кондиционера ЭВМ, имеющую повышенную рассеиваемую мощность и установленную в помещении на южной стороне, возможно, придется почти 20% времени держать в отключенном состоянии. В этом случае целесообразно применение кондиционеров со стоимостью до 20% стоимости ЭВМ.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Спецификации

Источники питания ЭВМ проектируются так, чтобы выдерживались определенные колебания напряжения сети, а при выходе за эти пределы – система отключалась.

Периферийные устройства с магнитными носителями могут работать при изменениях рабочей частоты, однако при считывании информации возможны искажения, если запись велась при различных частотах. В Великобритании администрация электросетей гарантирует при нормальных условиях колебание напряжения в сети – в пределах $\pm 6\%$, а также утверждает, что частота напряжения питающей сети находится в пределах $\pm 0,5\%$ номинальной. В моменты внезапных отключений нагрузки из-за избыточного потребления энергии или аварий на производстве эти пределы могут быть превышены, поэтому разумно покупать оборудование, которое выдерживает более широкие отклонения. Источники питания могут также допускать некоторые отклонения в форме питающего напряжения, кратковременные прерывания в подаче энергии или короткие импульсные всплески, наложенные на основное напряжение. Все электросети подвержены таким выбросам напряжений, и если при этом требования проектных спецификаций не соблюдаются, то в результате возможно разрушение информации или повреждение компонентов.

В табл. 4.3 приведены подробные требования к источникам питания для различных систем, выдвигаемые поставщиками систем базовых конфигураций. Из табл. 4.3 видно, что требования к стабильности напряжения и частоты довольно разнообразны, еще сильней различаются требования по гармоническим искажениям, пропаданию напряжения сети и выбросам напряжений. Если появляются требования по кондиционированию воздуха для источников питания, то это свидетельствует о недостаточной проработке проекта.

Таблица 4.3. Спецификации на источники питания для средних и больших систем

Допустимые отклонения напряжения, %	Допустимые отклонения частоты, %	Другие требования
+10 ÷ -8	± 1	–
± 10	± 1	Перерывы в подаче напряжения не более 100 мс. Выбросы не выше 100 В и длительностью менее 10 мс
± 10	± 1	Общие гармонические искажения не более 5%. Для 100% изменения нагрузки номинальное напряжение восстанавливается не более чем за 310 мс. Отклонения при переходных процессах не должны превышать ±10% номинальных (требования к синхронному генератору)
+7 ÷ -7,5	+1 ÷ -2	В течение 10 последовательных периодов напряжения сети не должно быть потеряно более чем пол-периода. Напряжение переходного процесса не выше 10 В при 1 кГц, изменяясь до 400 В при 4 МГц (характеристики фильтра)
± 7	± 1	Система должна выдерживать выбросы амплитудой 1 кВ и длительностью не более 2 мкс
± 10	± 5 (центральный процессор) ± 1 (периферийное оборудование)	Общие гармонические искажения не более 10% Перерывы в подаче энергии не более 600 мкс. Перенапряжения не выше 1 кВ

Табл. 4.3 (продолжение)

Допустимые отклонения напряжения, %	Допустимые отклонения частоты, %	Другие требования
± 5 с интенсивностью изменинений	± 1	Общие гармонические искажения не более 5%. Нужен синхронный генератор
± 2 в течение 1 с		
$+6 \div -10$	± 2	Напряжения при переходных процессах не должно превышать 0,7 номинального значения в течение 0,5 с, 2,5 номинального значения в течение 10 мс, 5 номинальных значений в течение 5 мс

Поставщики малых, мини- и микро-ЭВМ обычно выдвигают требования по стабильности питающего напряжения $\pm 10\%$ и по частоте сети от ± 1 до $\pm 10\%$. Во многих случаях форма кривой напряжения, прерывания в подаче энергии и выбросы напряжения не оговариваются, но они столь же разнообразны, как и для больших ЭВМ. Многие мини-процессоры имеют средства по компенсации нарушений питания. Эти средства осуществляют перезапись содержимого регистров в энергонезависимую память при нарушениях в подаче питания и автоматический рестарт при восстановлении подачи энергии. Эти возможности очень цепны для систем реального времени, зависящих только от процессора, так как пересылки от интерфейса ввода-вывода к периферийным устройствам, вероятнее всего, будут потеряны.

Защита

Для защиты от недопустимых изменений напряжения питания, длительных перерывов в подаче энергии и появления искажений в сети можно устанавливать мотор-генераторы. От недопустимых изменений частоты питающей сети можно защититься постановкой двойного преобразователя переменный ток – постоянный ток – переменный ток. С помощью мотор-генератора возможна защита от выбросов напряжений, с которыми борются также установкой электрических фильтров и развязывающих трансформаторов.

Большие системы, поступающие из США, иногда могут работать только от сети 60 Гц, так что здесь не обойтись без синхронного генератора. Многие большие процессоры рассчитаны на работу от источника питания 400 Гц, для чего также нужен синхронный генератор. При наличии генератора лучше обеспечивается защита от отключений в подаче питания.

Если в системе возможны длительные перерывы в подаче энергии, компенсировать которые изложенными выше средствами невозможно, то может возникнуть необходимость установки резервного дизель-генератора, который вводится в работу при перерывах в подаче энергии. Однако последняя возможность весьма дорогостоящая, чтобы быть оправданной для большинства применений.

Влияние включений и отключений на безотказность системы

Всякий раз, когда вычислительная система включается или отключается, компоненты подвергаются термическому удару, что в конечном счете может привести к увеличению числа отказов компонентов, зависящему, конечно, от качества компонентов или изделий. Для ранних моделей одной большой системы было обнаружено, что лишь в 50% случаев она могла работать после отключения и включения.

Производитель давал следующие значения ожидаемых потерь времени на ремонт системы:

Длительность перерыва в подаче энергии, мин	Наиболее вероятное время восстановления системы, ч	Дополнительные потери времени в течение ближайших 15 дней, ч
< 5	3	3
5–30	4	3
> 30	6	3

Эти данные показывают, что чем длительней перерыв, тем больший термический удар испытывают компоненты, поскольку они больше остывают, и тем дольше время простоя, ожидаемого из-за отключения-включения питания. После включения системы возможны перемежающиеся отказы в течение следующих 15 дней, которые увеличивают время простоя системы.

Недавние исследования "утренних болезней" ЭВМ на современных процессорах обнаружили, что включение машины не вызывает появления устойчивых отказов (которые требуют немедленного ремонта), а вызывает появление неустойчивых событий с интенсивностью, постепенно уменьшающейся от 12-кратного превышения долговременной средней их интенсивности в течение первого часа после включения до 1,5-кратного превышения указанного значения после 15 ч без какого-либо внешнего вмешательства.

Эти данные получены при отключении машины в конце рабочей недели на 2–2,5 дня, а отключения машины на время до 12 ч оказывали лишь небольшое влияние.

Был отмечен также факт, что всякое изменение непрерывного режима работы машины вызывает снижение ее надежности. Когда процессор ежедневно включается и выключается, компоненты, работающие в крайних предельных режимах, в конце концов выходят из строя. Если система остается после этого непрерывно под напряжением, то начинают проявляться другие слабые места в компонентах и безотказность системы может уменьшаться, пока другие компоненты, находящиеся в условиях крайних предельных режимов, не будут заменены. Это явление более характерно для больших систем, и когда поставщик настаивает на круглосуточном включении машины, даже если она используется не все время, то это верный признак того, что проект проработан некачественно, в нем остались компоненты, работающие в предельных режимных условиях.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Спецификации

Вычислительные системы подвержены разрушению информации от электромагнитного излучения; обычно требования к уровню электромагнитных помех находятся в следующих пределах:

от не более 100 мВ/м до 1 В/м в диапазоне частот 15 кГц – 9 ГГц и иногда до 14 В/м в диапазоне 15 кГц – 35 МГц.

Для достижения допустимой напряженности электромагнитного поля иногда приходится удалять ЭВМ на расстояние свыше 1,5 км от мощного радара или радиопередатчика. Другой способ защиты состоит в экранировании помещения для ЭВМ или в тщательном размещении блоков, кабелей и источников питания системы по отношению к источникам излучений.

Требования к заземлению

Чтобы исключить влияние помех, в том числе генерируемых самой вычислительной системой, большинство поставщиков требуют отдельной сигнальной шины земли, изолированной от защитной земли, и прокладывают ее специальными шинами

из одной центральной точки машинного зала. Наблюдаются изменения сопротивления земли от 1 до 5 Ом. При 1 Ом это, по-видимому, просто сопротивление кабеля. Один производитель требует прокладки сетки из медного провода с размером ячейки 5×5 см² под фальшполом с подсоединением ее к заземлению.

При первоначальной установке систем особое внимание обращается на отсутствие контуров заземляющих шин, но в практике, однако, такие контуры появляются при установке дополнительного оборудования. Для борьбы с этим явлением полезно иметь средства, позволяющие легко отсоединять участки сигнальной шины земли для ее проверки.

УДАРЫ И ВИБРАЦИЯ

Иногда производители оговаривают допустимый уровень ударов и вибрации. Их типичные значения:

максимальный удар – от 5g в течение 10 мс с интервалом 5 с между ударами до 30g в течение 11 мс синусоидальной полуволны по трем осям (эти требования важны при необходимости транспортировки оборудования) ;

максимальная вибрация – амплитуда $\pm 0,04$ мм при частоте 10–31 Гц, максимальное ускорение 0,15g при 31–100 Гц или амплитуда 0,5 мм при частоте 5–10 Гц, максимальное ускорение 0,25g на 10–100 Гц, или 0,3 мм смещения между пиками при частоте 10–55 Гц, и максимальное ускорение 1g при 44 Гц.

Глава 5

НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

СРАВНЕНИЕ С АППАРАТУРОЙ

Причины отказов

В абсолютно идентичных условиях одно и то же программное обеспечение ведет себя все время одинаково, и если оно корректно, то можно утверждать, что оно совершенно надежно. К сожалению, вопрос корректности программного обеспечения остается открытым, пока система ведет себя не так, как этого ожидает пользователь, хотя оно, возможно, и удовлетворяет самым широким требованиям спецификации. Причины возникновения отказов в аппаратуре и программном обеспечении различны:

Аппаратура

- A. Наличие логических ошибок в проекте или его несовершенство
- B. Ошибки конструирования
- C. Внутренняя ненадежность компонентов
- D. Временной износ (уменьшение безотказности)

Программное обеспечение

- Наличие логических ошибок в проекте или его несовершенство
- Неправильное кодирование, ошибки объединения (сборки) отдельных программ в одну общую

После написания и сборки программы, как и аппаратура, подвергаются испытаниям, проверяющим качество проектирования, чтобы убедиться в выполнении требований спецификации по функциональным возможностям, производительности и физическим ресурсам. Сравнительно легко

проверить возможность выполнения требуемых функций, но практически невозможно проверить выполнение этих функций во всех режимах работы, на всевозможных комбинациях и последовательностях данных и управления. Здесь по сравнению с аппаратурой имеется то отличие, что исчерпывающая проверка программного обеспечения часто просто невозможна, в то время как для аппаратуры пишутся исчерпывающие тесты проверок конструктивных дефектов и тесты, связанные с решением задач безотказной работы аппаратуры в течение больших интервалов времени. Поэтому если программное обеспечение создано впервые, то оно наверняка содержит как некорректности логического характера, так и ошибки кодирования.

Конечно, это спорный вопрос – что сложнее, аппаратура или программное обеспечение, но обычно в силу разнообразия и общего объема программное обеспечение исключительно сложно. Для большинства систем объем общего программного обеспечения оценивается не менее чем в 500 000 команд или информационных слов: Если сравнить число логических элементов в процессоре с числом информационных слов в программном обеспечении, то для типичных систем число информационных слов в 3–10 раз больше числа логических элементов в системе. Исключение могут составить лишь уникальные экземпляры супер-ЭВМ, где объем аппаратуры чрезвычайно велик.

Из-за большого объема программного обеспечения невозможно добиться выполнения сразу всех требуемых функций, и поэтому следует запланировать в будущем выпуск дополнений и изменений. В отличие от аппаратуры для программного обеспечения почти невозможно рассчитать заранее на этапе проектирования достижимое быстродействие. Впоследствии неизбежно обнаруживается, что некоторые функции выполняются слишком медленно, поэтому возникает необходимость доработок для повышения производительности системы. С повышением производительности связана и другая проблема – распределение аппаратурных ресурсов, предоставляемых программам. Зачастую первоначальные требования ресурсов для решения задач пакета оказываются чрезмерными и приходится переписывать часть программ. Ко всему этому следует добавить изменения, вносимые в аппаратуру, связанные со всевозможными исправлениями и улучшениями. Следовательно, программное обеспечение непрерывно изменяется, вызывая тот же эффект, что и регулярная замена больших частей аппаратуры, разработанных заново.

Интенсивность ошибок

Производители могут подсчитать интенсивность ошибок в программном обеспечении исходя из отношения числа проектных или кодировочных ошибок к общему числу команд. Это отношение лежит в диапазоне от 0,25 до 10 на 1000 команд, так что для новой системы, содержащей 500 000 команд, можно ожидать от 125 до 5000 ошибок. Предварительные проверки качества проектирования позволяют исправить сравнительно простые ошибки, и, хотя максимальное число ошибок можно ожидать сразу после первого выпуска программного обеспечения, интенсивность

вновь обнаруживаемых ошибок остается довольно постоянной. Это объясняется тем, что программное обеспечение распространяется среди различных пользователей, а скрытые ошибки проявляются при длительной работе с самыми разнообразными задачами.

После выпуска нового варианта программного обеспечения (это может произойти через несколько недель или даже через год после первого варианта) по-прежнему остается вероятность наличия ошибок в старом варианте, даже в тех кодах, которые изменились для устранения других недоработок. Поэтому не стоит удивляться тому, что производители требуют от потребителей перехода на новую версию программного обеспечения после сравнительно короткого периода времени.

Исправления

Когда ошибка в программном обеспечении зафиксирована и найден способ ее исправления, то обычно оказывается, что эта ошибка находится в плохо испытанном множестве проверок, и, несмотря на то, что все пользователи информируются об ошибках специальными бюллетенями, на исправления ошибок решаются обычно лишь те, кто сталкивается с этими ошибками в своей работе. Это, конечно, не относится к ошибкам, выявленным в программах для решения целого класса задач, а только к тем, которые охватывают решение сравнительно небольшого класса задач (например, у одного изготовителя лишь 10% пользователей внесли все опубликованные изменения в свое программное обеспечение). Все исправления собираются и готовятся для будущего выпуска либо как инструкция для пользователя, либо как заранее запланированное улучшение проекта.

Ранняя стадия жизни

Упоминавшиеся ошибки программного обеспечения вызывались либо логическими ошибками или несовершенством проекта, либо ошибками в кодировании информации. Для каждого пользователя возникают специфические трудности, не похожие на те, которые вызываются неисправностями в аппаратуре. Если бы существовала корректная версия программ, то ее всегда можно было бы скопировать и проверить. Трудности возникают оттого, что задачи пользователя решаются программами, представляющими собой сборки стандартных программных модулей, и здесь возможны ошибки в сборке или ошибки, связанные с уникальностью самой конфигурации системы, которая не могла быть испытана заранее.

Вообще говоря, для систем, имеющих вновь разработанную аппаратуру и программное обеспечение, проблемы, связанные с надежностью программного обеспечения, по-видимому, вначале доминируют над аппаратными, главным образом потому, что:

- 1) имеется много программ с ошибками;
- 2) программное обеспечение непрерывно подвергается изменениям (перепроектированию).

Иключение из этого составляют супер-ЭВМ, у которых вопросы надежности аппаратуры стоят более остро, чем надежность программ. По мере

старения систем программное обеспечение становится более корректным, потребитель начинает соблюдать ограничения, налагаемые на систему, и на первое место выдвигаются задачи обеспечения надежности аппаратуры.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Собирая статистику по корректности и надежности программного обеспечения, трудно проводить сравнения программного обеспечения, поставляемого различными производителями. Трудности начинаются с определения ошибок программного обеспечения, которое может быть дано в одной из следующих формулировок:

- 1) все неудачи при решении задач, с которыми сталкивается пользователь;
- 2) ошибки, представленные пользователями производителю системы;
- 3) ошибки, признанные производителем системы;
- 4) идентифицированные ошибки;
- 5) ошибки, для которых найдены способы их исправления;
- 6) ошибки, для которых способы их исправления найдены и предоставлены пользователю.

Проблема отказов с точки зрения пользователя

Не существует готовой статистики по частоте возникновения событий из-за отказов программного обеспечения, наблюдаемых пользователями или программистами. Некоторые отказы дают такие же признаки, как и неисправное оборудование (такие, как полная остановка системы), при этом каждое событие может быть зафиксировано в журнале ошибок автоматически или дежурным оператором, а другие отказы могут фиксироваться лишь эпизодически. Следует заметить, что некоторые (например, необнаруженные) дефекты аппаратуры приводят к документированию нескольких событий, связываемых с ошибками отдельных программ, хотя они могут быть вызваны одним и тем же необнаруженным дефектом. Различные типы ошибок программного обеспечения даны в гл. 6.

Ошибки, представленные пользователем

На рис. 5.1 и 5.2 представлено распределенное по месяцам число ошибок в программном обеспечении, представленных пользователями двум различным производителям систем.

На рис. 5.1 представлены ошибки как в операционной системе, так и в других программах. Пользователь фиксировал в операционной системе в среднем по 92 ошибки в месяц с максимальным числом ошибок 134, вызванных новой доработкой программного обеспечения. В остальных программах в среднем за месяц фиксировалось 103 ошибки. На рис. 5.2 показаны ошибки операционной системы, фиксированные пользователем в течение времени, когда было получено три извещения о доработке программного обеспечения. В течение первых 11 мес интенсивность ошибок была примерно постоянной – от 605 до 758 в месяц, в течение последних 11 мес тоже примерно постоянной – от 217 до 308 в месяц.

Рис. 5.1. Ошибки, зафиксированные пользователем (производитель А)

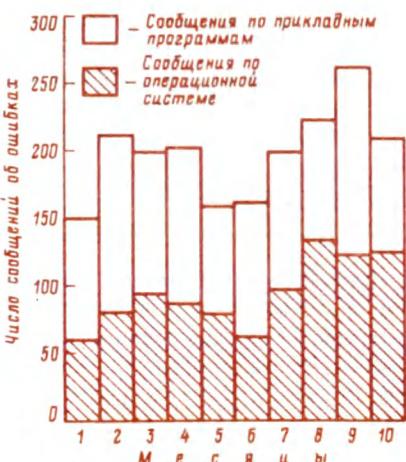
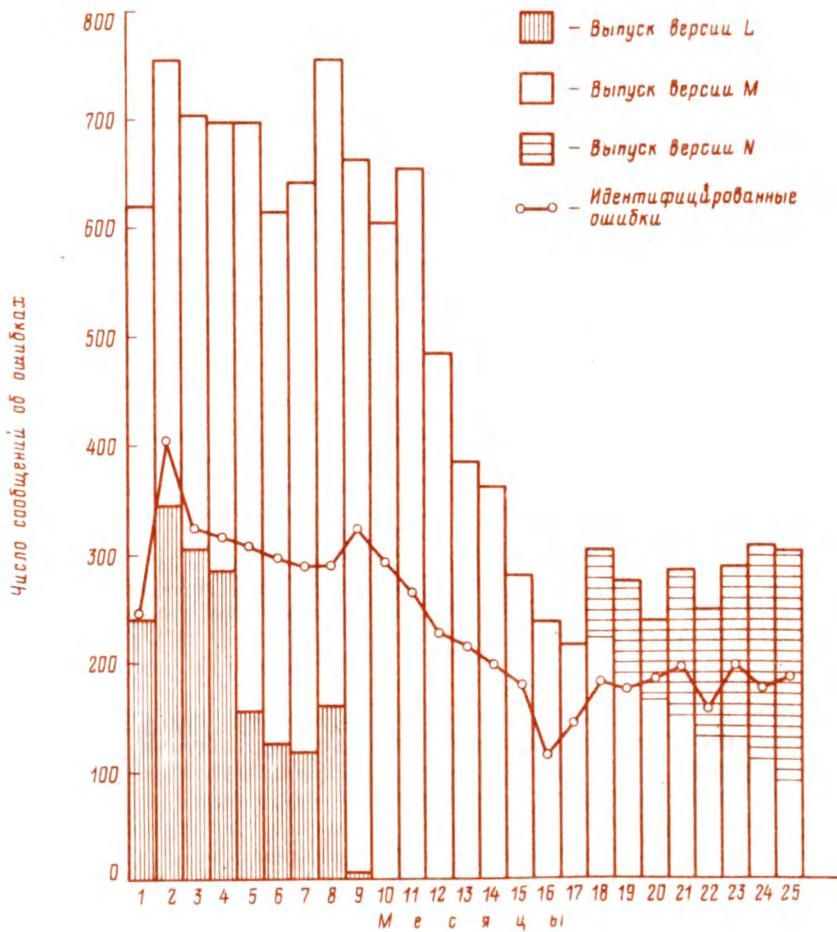


Рис. 5.2. Полученные и идентифицированные изготавителем ошибки в течение выпуска трех версий операционной системы (производитель В)



Сравнивая качество программного обеспечения двух производителей, следует заметить, что вторая операционная система — более сложная по числу команд и имеет почти вдвое большее число пользователей.

Можно привести полезные данные о числе ошибок, подсчитанные для обоих производителей с учетом изменений в течение месяца:

На 1000 команд	0,4–2,0
На 1 систему	0,5–4,2
На 1000 команд на 100 систем	0,3–1,0

Приведенные данные не учитывают такие факторы, как число изменений в проекте, основные принципы проектирования, квалификацию программистов, проведение на ранних стадиях испытаний по проверке качества проектирования и обратную связь к пользователю по исправленным ошибкам. Тем не менее эти данные могут служить основанием для планирования работ по коррекции программного обеспечения для конкретного производителя. В случае одного производителя прогноз состоит в определении числа систем и штата обслуживающего персонала исходя из того, что ожидается 12 ошибок в год на одну систему.

Ошибки, признанные производителем

Для системы производителя А (см. рис. 5.1) примерно 25% зафиксированных пользователями ошибок содержат либо недостаточно информации для принятия их к рассмотрению, либо лишь намеки на причины ошибок. Еще 25% определены как ошибки пользователя либо документации. Остается примерно половина ошибок, которые могут рассматриваться как реальные недостатки программного обеспечения. В системе второго производителя В (рис. 5.2) 5–10% ошибок оказались мнимыми ошибками, 5–17% — недостаточно очевидны, 5–10% — из-за отказов аппаратуры, и до 5% — ошибки документации. Эти значения несколько ниже, чем для системы производителя А, по-видимому, из-за того, что пользователей просили фиксировать только те ошибки, которые проявятся не менее 2 раз.

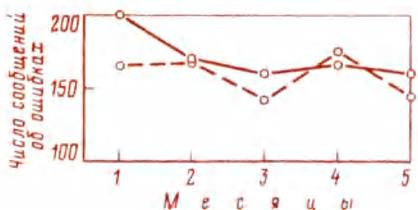


Рис. 5.3. Принятые и исправленные ошибки версии R операционной системы (производитель С):

—○—○ — данные об ошибках, полученные производителем; ○---○ — идентифицированные производителем ошибки

В системе третьего производителя С на уже установленной операционной системе, несколько меньшей по размерам, чем предыдущая, но установленной на почти вдвое большем числе ЭВМ, принятые производителем к доработке ошибки составляют в среднем 171 в месяц (рис. 5.3).

Идентифицированные и исправленные ошибки

Для ошибок программного обеспечения системы производителя А было обнаружено, что около 25% – это повторение уже известных ошибок программного обеспечения. Из рис. 5.1 видно, что в месяц обнаруживалось 23 ошибки операционной системы и 26 ошибок в компиляторе и других программах. В течение 6 мес были получены следующие данные:

Сколько раз учитывались одни и те же ошибки

1	172
2	48
3	25
4	5
5	5

Число исправленных ошибок

Таким образом, на 255 ошибок было сделано 388 фиксаций этих ошибок, что дает 1,52 фиксации на одну реальную ошибку. По выявленным ошибкам пользователям были разосланы корректировочные извещения, причем в 10 случаях пришлось ввести новые ограничения, а в 16 случаях – задержать изменения до выпуска следующего извещения, это 2 и 4% принятых к рассмотрению ошибок соответственно.

На рис. 5.2 показаны ошибки обнаруженные, но не обязательно исправленные для программного обеспечения системы пользователя В.

Отношение числа фиксированных ошибок к идентифицированным составляет 2,18 в течение 1-го года и 1,6 в течение 2-го.

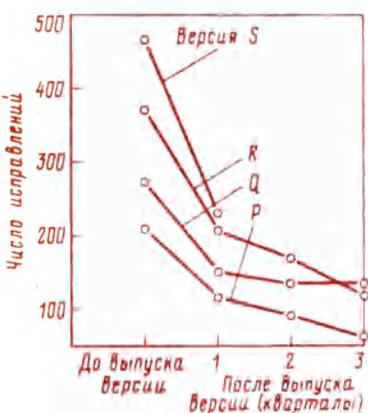


Рис. 5.4. Исправление ошибок в операционной системе, производитель С (различные версии – P, Q, R, S)

На рис. 5.4 отражена коррекция выявленных ошибок после получения четырех ежеквартальных извещений (в порядке P, Q, R, S) об исправлениях в программном обеспечении системы производителя С. После извещения R отношение принятых к рассмотрению ошибок (см. рис. 5.3) к исправлениям стало около 2,8.

Общая интенсивность ошибок

Рассмотренный диапазон 1,5–2,8 фиксаций ошибок на одну реальную ошибку свидетельствует о разнообразном характере проявления программных ошибок и сильной зависимости их от программ пользователя. Они в основном определяют общую интенсивность ошибок. На основании имеющейся информации нельзя узнать, сколько исправленных ошибок

бок сохранило прежнюю кодировку или сколько кодовых слов было изменено, однако если предположить, что вся кодировка переписывается раз в 2 года, то интенсивность ошибок программного обеспечения рассмотренных трех производителей находится в пределах от 2,3 до 4,5 ошибки на 1000 команд.

ГАРАНТИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Существует много различных стандартов на испытания программного обеспечения до выпуска его на рынок. Они различаются используемой при испытаниях конфигурацией системы, составом испытаний, длительностью испытаний и критериями успеха. Ниже следуют примеры испытаний.

Конфигурации

Операционная система всегда подвергается испытаниям у производителя: вся конфигурация системы собирается в одном помещении и здесь проверяется. Сама конфигурация может быть минимальной, максимальной или промежуточной. Большинство производителей предусматривают также предварительные испытания у пользователей; эти испытания могут производиться одновременно с заводскими испытаниями и проводятся для нескольких систем – от 1 до 15 и более.

Состав испытаний

Состав испытаний может изменяться от прогонки ряда тестовых задач, полученных от пользователей, до специально разработанных тестов проверки функциональных возможностей, измерения производительности и т. п.

Длительность испытаний

Длительность испытаний зависит от конфигурации системы и состава испытаний, но типичным можно считать период, включая испытания в условиях пользователя, от 1 до 6 мес и более для операционных систем. Один производитель сообщил, что до выпуска системы он испытывал ее в течение 40 000 ч.

Критерии успеха

Для операционных систем критерии успеха следующие:

1. Наилучшее продвижение – если от одной версии операционной системы до следующей удается устраниТЬ 50% старых ошибок.
2. Не более восьми известных ошибок в каждом из основных пакетов прикладных программ.
3. Не более одного отказа системы за 12-часовой период в течение последней недели испытаний у производителя. Не выпускать систему потребителю, если она содержит более 50 ошибок, требующих исправления. Не более пяти неисправленных некритических ошибок и ни одной известной ошибки, ведущей к отказу системы или какой-либо критической ошибке.

4. Минимизация потерь времени – должно быть не более одного отказа системы в неделю с не более чем 10-минутным восстановлением. Не более 10 известных отказов (включая и оставшиеся после испытаний у производителя).

Относительно некоторых из числа более строгих критериев известно, что они никогда не достигались до начала использования операционной системы, но обычно они гарантировали, что в отдельных программах оставалось меньше ошибок, чем в среднем.

Организация испытаний

Испытания у производителя могут меняться от проверок программистами, писавшими программное обеспечение, до развернутых независимых испытаний службы гарантии качества. Правда, один производитель возложил все испытания на программистов, утверждая, что испытания службой гарантии качества оказались неэффективными.

Эффективность испытаний

Из предыдущего совершенно ясно, что из-за разнообразия характера и проявления ошибок совершенно нереально надеяться, что предварительное испытание программных комплексов избавит их от всех имеющихся ошибок. Но по меньшей мере оно должно обнаружить ошибки, оказывающие влияние на работу большинства пользователей.

Эффективность мер по поддержанию качества программного обеспечения показана на рис. 5.4, где для первых трех выпущенных версий программного обеспечения видно, что число исправлений, оставшихся после предварительных испытаний версий, оставалось сравнительно постоянным на уровне 40%. Учитывая, что в рассматриваемый период число установленных систем более чем удваивается, ошибки следует выявлять и исправлять с возрастающей интенсивностью до выпуска версии.

СЕРВИСНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Задержки исправления ошибок

В течение любого месяца производитель должен иметь достаточно средств и возможностей, чтобы исправлять примерно столько же старых ошибок, сколько выявляется новых. Обычно первые ошибки исправляются медленно и всегда среди последующих ошибок есть трудные для быстрого исправления, поэтому неизбежно накапливается задержка в исправлении ошибок. Для рассмотренных ранее систем трех производителей эта задержка составляет от 8 до 39 дней заслуживающих внимания вновь обнаруженных ошибок. В других случаях эта задержка достигала 6 мес.

Время реакции

Время реакции можно определить как период времени между получением сообщения об обнаружении ошибки до высылки ответа потребите-

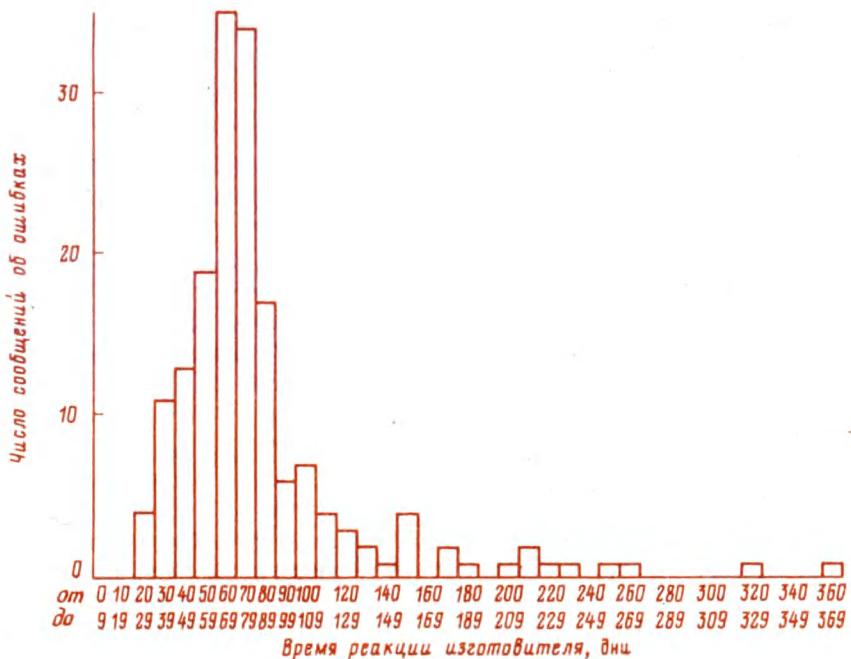


Рис. 5.5. Время реакции изготовителя на программные ошибки от получения сообщения до публикации исправлений. Среднее – 82 дня; медиана – 70 дней

лю. С этим термином возникают такие же трудности, как и с термином "ошибки", ведь качество реакции может сильно меняться. В одном случае среднее измеренное время реакции составляло 14 дней, но при этом 40% ошибок находилось "в состоянии исследования". В другом случае время реакции в разные периоды составляло от 35 до 56 дней, но ответы потребителю содержали решение почти всех трудностей.

На рис. 5.5 дано распределение времени реакции для системы второго производителя, но здесь время реакции считалось от даты получения сообщения об ошибке до выпуска общего сообщения для всех пользователей. Среднее значение времени реакции здесь 82 дня.

Вообще говоря, при постоянных и ограниченных ресурсах среднее время реакции должно быть, по-видимому, по меньшей мере равно временным задержкам, о которых говорилось выше.

Для особой категории пользователей время реакции может быть уменьшено с помощью опытного и квалифицированного персонала. Практика показала, что в таких случаях значительная доля ошибок исправляется в день поступления сообщений о них.

Приоритеты

Большинство производителей разработало шкалу приоритетов для сообщений пользователя об ошибках, и эта шкала меняется от простого списка приоритетов (нижний, средний, высокий) до изощренного, осно-

ванного на последствиях проявления ошибок. Например, приоритет 1 — никакая работа системы невозможна; приоритет 2 — невозможны важные работы и т. д. Чем выше приоритет, тем меньше ожидаемое время реакции. Для одной системы с такой сложной шкалой (эта система с указанным выше временем реакции 14 дней) время реакции для приоритета 1 составляло 3 дня. Для другой системы, применявшей более простую шкалу (это система со временем реакции 35–56 дней), по-видимому, не было разницы во временах реакции на ошибки высокого и низкого приоритетов, хотя время реакции на ошибки операционной системы было меньше, чем для остального программного обеспечения.

Обслуживаемость, времяя простоя и системные отказы

Вопросы обслуживаемости и времени простоя вычислительных систем рассмотрены соответственно в гл. 7 и 8. Коэффициент обслуживаемости вводится следующим образом:

Время работы

Время работы + Время простоя

Подобным же образом вводится коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости:

Время простоя

Время работы + Время простоя

Для вычислительных систем коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, может быть разбит на составляющие части, представляющие влияние аппаратуры и программного обеспечения:

Время простоя процессора
и главной памяти

Время простоя системы из-за
периферийного оборудования

Время работы + Общее время простоя

Время работы + Общее время простоя

+ Время простоя системы из-за ошибок программного обеспечения

+ Время работы + Общее время простоя

Также мог бы быть подсчитан коэффициент обслуживаемости для программного обеспечения, что позволило бы учесть его полноту, корректность и время, необходимое для исправления определенного класса ошибок. Однако сведение подобных характеристик в одну характеристику, по-видимому, не дало бы существенной пользы. По отношению к аппаратуре наиболее полезен коэффициент обслуживаемости системы, когда принимаются во внимание только те простой, которые охватывают всю систему в целом.

Что касается операционной системы, то простой системы из-за ошибок программного обеспечения в различные периоды времени могут быть обусловлены:

- 1) потерями времени при выводе данных из оперативной памяти;

- 2) временем восстановления прерванного процесса;
- 3) временем на исследование ошибки на работающей системе – в некоторых системах предусмотрена возможность дистанционного оперативного запроса для диагностирования программной ошибки;
- 4) временем ожидания обслуживания – в некоторых случаях пользователь может заявить, что система бесполезна, пока не будет исправлена некая программная ошибка, как, например, случайное нарушение защиты данных или искажение самих данных. Эти трудности аналогичны тем же трудностям, которые возникают при отказах аппаратуры;
- 5) временем на исправление программ и последующую их проверку либо в связи с п. 4, либо при необходимости внесения других исправлений во время нормальной работы системы;
- 6) потерями времени на выяснение источника обнаруженной ошибки – аппаратура или программное обеспечение. Это действительно сложная проблема, и часто без тщательного анализа нельзя дать обоснованного ответа; этот процесс может длиться часами. Известен случай, когда 60% остановов системы были зафиксированы как программные ошибки наряде систем, а в конце выяснилось, что это ошибка аппаратуры.

В дальнейшем в большинстве случаев будут учитываться факторы, изложенные в пп. 1, 2 и 6, и чаще даже только время восстановления.

Из п. 6 видно, что инженеру трудно определить, где находится ошибка – в аппаратуре или программе. В некоторых случаях такое разделение ответственности становится очень трудным, например при ошибке в программах восстановления, когда аппаратурный отказ, который в нормальных условиях мог бы быть восстановлен, ведет к системному отказу. Другой пример, когда ошибка в программном обеспечении не позволяет выполнить испытательную программу проверки периферийного оборудования. В этом случае можно попытаться изменить конфигурацию системы, чтобы проверить это оборудование.

ИЗМЕНЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

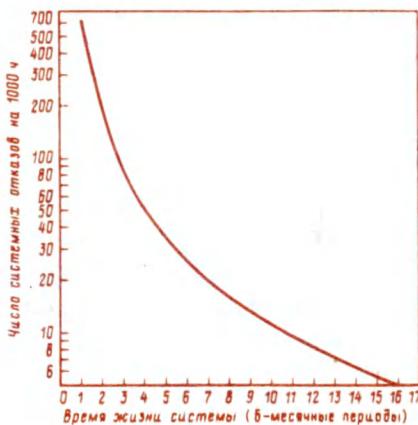
Средние результаты на длительных промежутках времени

Как уже говорилось, несовершенство проекта и наличие логических ошибок в нем, неправильное кодирование программ порождают большое число программных ошибок.

На рис. 5.6 показана кривая, характеризующая улучшение системы с точки зрения содержащихся в ней программных ошибок за длительный интервал после выпуска первой версии операционной системы. На рисунке приведены данные по интенсивности отказов для средних и больших процессоров, причем влияние выпусков последующих версий операционной системы за короткие промежутки времени игнорируется, хотя они могут снижать среднюю интенсивность в 10 раз. Если за интервал отсчета времени взять 6-месячный период, то интенсивность отказов уменьшится в 60 раз через 5 лет, что значительно больше, чем для самого плохого процессора, описанного в гл. 2. Характер поведения графика числа системных отказов во времени тоже отличен от графиков для аппаратуры, на-

Рис. 5.6. Изменение во времени числа системных отказов, вызванных программными ошибками, после первой поставки большой операционной системы

дежность программного обеспечения продолжает повышаться, достигая улучшения в 120 раз за 8 лет. При условии, что ошибки вовремя исправляются, такое повышение надежности могло бы длиться и далее до достижения безошибочного программного обеспечения. Однако ясно, что это заняло бы много лет и практическое достижение этого рубежа нереально. Начальная интенсивность отказов в терминах наработки на системный отказ около 1,5 ч. Ясно, что система с такими надежностными характеристиками обладает очень низкой реальной производительностью.



Средние результаты на коротких промежутках времени

Выпуск новых версий. На рис. 5.7 приведена характеристика другой операционной системы за 2,5 года. Данные соответствуют не первой версии операционной системы и отражают среднюю интенсивность системных отказов. С выпуском каждой новой версии операционной системы



Рис. 5.7. Усредненные системные отказы семейства отложенных вычислительных систем



Рис. 5.8. Явные ранние отказы, вызванные программными ошибками на отлаженной операционной системе (исключены две системы с высокой интенсивностью ошибок)



Рис. 5.9. Системные отказы, вызванные программными ошибками после передачи систем пользователю (две ранее исключенные системы — см. рис. 5.8)

реализовывали новые версии одновременно. Вслед за повышением интенсивности отказов наступает улучшение надежностных характеристик, причем сравнительно медленно, по мере исправления ошибок.

Ранние отказы. Для систем одного и того же типа в течение одинакового промежутка времени наблюдаются значительные расхождения в выявлении ошибок программного обеспечения, что определяется условиями применения систем. Примеры приведены на рис. 5.8 и 5.9. Данные на рис. 5.8 собраны от 28 систем, находящихся в работе более 1 года, приведены к единой дате передачи пользователю программных материалов и представляют ранние отказы для хорошей в среднем системы. (Системы, представленные на рис. 5.9, были исключены из выборки, поскольку они сильно искажают общую картину.) В 1-й мес интенсивность отказов в 10 раз выше, чем во 2-й. Другие экстремумы интенсивности связаны, вероятно, с выпуском извещений по доработке программного обеспечения, а экстремум интенсивности отказов 3-го мес — с началом работы с программами пользователя.

Самая лучшая система, для которой за 16 мес не было обнаружено ни одной программной ошибки, очевидно, связана с простыми применениями, для которых была проведена хорошая предварительная отладка у производителя.

Результаты на коротких периодах для отдельных систем

Из худших систем, приведенных на рис. 5.9, одна оказалась "устойчиво плохой", примерно в 20 раз хуже, чем средняя хорошая система. Эта

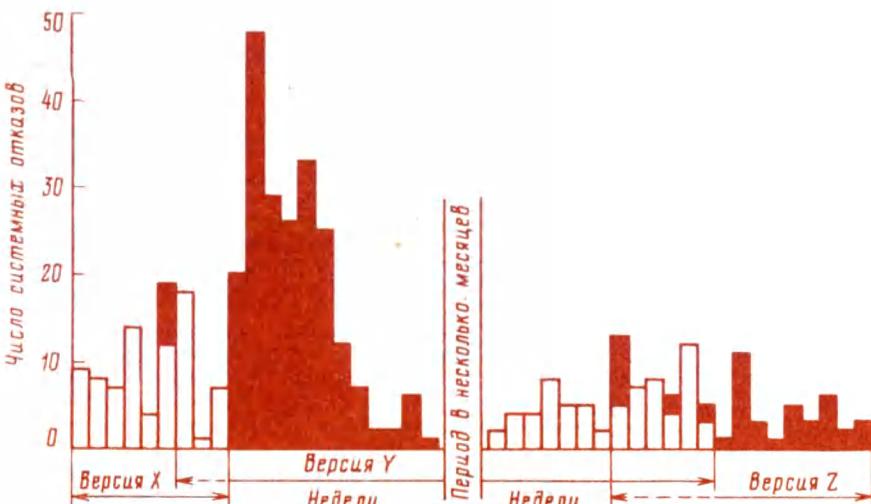


Рис. 5.10. Системные отказы, вызванные программными ошибками до и после выпуска новых версий:

□ – старая версия; ■ – новая версия

система работала в одном из отделов у изготовителя и использовалась для самых широких применений, включая отладку программного обеспечения. Ухудшение в начальный период связано с ростом числа решаемых прикладных задач, а второе ухудшение вызвано выпуском новой версии операционной системы.

Вторая из "плохих" систем в течение первых 4 мес вообще не имела отказов из-за ошибок программного обеспечения, а затем ее отказы резко увеличились. По-видимому, на начальном этапе в этой системе проводились лишь самые простые программные проверки, а внезапные ухудшения связаны с выпуском новых версий операционной системы, требовавших реализации новых функциональных возможностей.

Выпуск новых версий. Второй пример связан с влиянием на системные отказы выпуска новых версий операционной системы. Еженедельные данные последствий выпуска новой версии операционной системы приведены на рис. 5.10. Весьма типично, что этот пользователь реализовывал новые версии в течение короткого отрезка времени. И поначалу находил их неудовлетворительными и поэтому не использовал (см. версию X на рис. 5.10).

С введением версии Y число системных отказов резко увеличилось. Версия Z не внесла существенного ухудшения, видимо, из-за постепенной ее реализации.

РАЗБРОСЫ ЗНАЧЕНИЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ. СРАВНЕНИЕ С АППАРАТУРОЙ

Данные, приведенные выше, показывают, что в первое время следует ожидать, что безотказность программного обеспечения будет значительно

Таблица 5.1. Системные отказы и коэффициент, обратный коэффициенту обслуживания

Базовая конфигурация			Остальная аппаратура			Вся аппаратура	
Наработка на системный отказ, ч	Среднее время простоя на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Наработка на системный отказ, ч	Среднее время простоя на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Наработка на системный отказ, ч	Среднее время простоя на системный отказ, ч
21,3	0,91	4,1	71,4	0,87	1,2	16,4	0,92
38,5	1,03	2,6	137,0	0,83	0,6	30,0	1,00
37,3	0,80	2,1	89,3	0,63	0,7	26,3	0,76
21,7	0,69	3,1	63,7	0,71	1,1	16,2	0,71
250,0	1,51	0,6	151,5	1,68	1,1	94,3	1,63
119,0	1,93	1,6	178,6	1,44	0,8	71,4	1,75

ниже, чем у аппаратуры, а выпуск новых версий программного обеспечения лишь усугубляет дело. Но это не всегда так. Можно привести примеры, когда отказы аппаратуры вызывали столько же или больше системных отказов, чем программные ошибки, и часто давали большие простои. Последнее связано с тем, что ошибки в аппаратурной части могут потребовать значительного времени исследования, в то время как большая часть времени простои из-за программного обеспечения определяется затратами на восстановление вычислительного процесса.

Отличия у разных потребителей

В табл. 5.1 приведены данные о среднем времени между системными отказами, среднем времени простоя на отказ системы и коэффициенте, обратном коэффициенту обслуживаемости, для ряда вычислительных систем у различных потребителей. Значения даны отдельно для базовой конфигурации системы (процессор + ОЗУ), для остальной аппаратуры и для программного обеспечения. Все данные приведены для семейства от сравнительно больших процессоров до больших с хорошо отложенным программным обеспечением и расположены в порядке убывания вычислительной мощности. Последние четыре системы созданы для примерно одинаковых целей. Для пяти из шести типов систем интенсивность системных отказов, вызываемых аппаратурными отказами, выше, чем вызываемых программными. Во всех случаях общее время простои из-за аппаратуры выше, чем из-за программного обеспечения. Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, для аппаратуры в 3–18 раз выше, чем для программ. Следовательно, на отложенных системах до введения новой версии программного обеспечения аппаратурные отказы и простои из-за них более вероятны, чем программные. Конечно, возможны экстремальные случаи, связанные с программными ошибками (см. рис. 5.9).

Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Программы			Система в целом		
	Наработка на отказ, ч	Среднее время простоя на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Наработка на отказ, ч	Среднее время простоя на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %
5,3	56,5	0,17	0,3	12,7	0,75	5,6
3,2	45,5	0,50	1,1	18,1	0,81	4,3
2,8	28,7	0,12	0,4	13,7	0,46	3,2
4,2	100,0	0,30	0,3	13,9	0,65	4,5
1,7	205,0	0,45	0,2	64,5	1,26	1,9
2,4	65,3	0,30	0,5	34,1	1,02	2,9

Разбросы значений безотказности на длительных промежутках времени

На рис. 5.7 раздельно приведены системные отказы, вызываемые аппаратурными отказами и программными ошибками на отрезке в 2,5 года. За исключением одного экстремального значения, вызванного введением процессора новой модификации, можно видеть, что общая тенденция поведения аппаратурных и программных отказов совпадает. Это свидетельствует о том, что некоторые из отказов, возможно, классифицированы неправильно, или что введение нового программного обеспечения вызывало проявление новых аппаратурных отказов, или что иногда причиной такой зависимости могут быть дополнительные модификации системы. Следует подчеркнуть, что обычно системные отказы из-за аппаратуры доставляют большие трудности по их ликвидации, чем программные. Не следует забывать, что здесь приведены лишь средние данные по семейству систем.

Разбросы значений безотказности для машин одного типа

Характер использования однотипных вычислительных систем с отлаженным программным обеспечением оказывает большее влияние на безотказность аппаратурной части, чем на безотказность программного обеспечения. В табл. 5.2 приведено среднее время между системными отказами и коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, по аппаратуре и программному обеспечению для восьми систем одного типа. Для аппаратуры различия в безотказности достигают 10-кратной величины, а в указанном коэффициенте, обратном коэффициенту обслуживаемости, — в 3,6 раза. Несовпадение этих различий связано с тем, что инженер (или пользователь) может оказывать влияние на число регистрируемых отказов. В одних случаях он анализирует все события, что ведет к повышению среднего времени между системными отказами, но в то же время увеличивает общее время простоя системы. В других случаях, учитывая возможный перемежающийся характер неисправностей, инженер продол-

Таблица 5.2. Системные отказы и коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, для восьми ЭВМ одинакового типа за 6 мес

№ системы	Аппаратура		Программы		Система в целом	
	Наработка на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Наработка на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %	Наработка на системный отказ, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %
1	15,4	4,6	83,3	0,6	13,0	5,2
2	25,0	3,7	100,0	0,6	20,0	4,3
3	76,9	1,7	202,0	0,2	55,7	1,9
4	22,7	2,1	120,0	0,2	19,1	2,3
5	7,7	6,1	125,0	0,2	7,3	6,3
6	17,9	2,4	115,0	0,3	15,5	2,7
7	12,3	5,8	111,0	0,4	11,1	6,2
8	8,8	4,1	28,6	1,0	6,7	5,1

жает работу, накапливая материал об этой неисправности; такая тактика уменьшает среднее время между отказами, но и уменьшает простой системы. Для программного обеспечения различия в интенсивности системных отказов достигают отношения 7:1, а в коэффициенте, обратном коэффициенту обслуживаемости, — 5:1, будучи в абсолютных значениях значительно меньше, чем для аппаратуры.

Разбросы значений безотказности на коротких промежутках времени

Ниже приведены суммарные данные об отказах аппаратуры и программного обеспечения за одно и то же время для системы, представленной на рис. 5.10:

Версии	Число отказов системы на неделю (100 ч)			
	Аппаратура		Программное обеспечение	
	Среднее	Диапазон	Среднее	Диапазон
Выпуск версии X	7,3	1–18	8,8	1–18
Выпуск версии Y (первые 6 недель)	4,2	1–8	30,2	20–40
Версия Y (остальное время)	6,4	1–11	4,7	1–12
Выпуск версии Z	4,3	2–10	4,0	1–11

Данные показывают среднее значение и диапазон изменений числа отказов как для аппаратуры, так и для программ; особо рассмотрен случай выпуска версии Y. Можно сделать интересное наблюдение: с выпуском новой версии программного обеспечения число фиксируемых отказов аппаратуры уменьшилось, что может быть связано с трудностями иден-

тификации источника ошибки — аппаратура или программы. Общее различие за 4-недельный период составило:

Источник системных отказов	Среднее время между отказами системы, ч	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, %
Аппаратура	8,0–44	1,6–8,5
Программное обеспечение	2,9–36	0,8–9,4
Система	2,7–19	3,4–11,9

На этом отрезке времени заметно сильное влияние выпуска новой версии программного обеспечения, что расширяет диапазон разбросов интенсивности системных отказов; отказы программного обеспечения также ведут к значительному кратковременному ухудшению обслуживаемости.

СПЕЦИФИКАЦИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

При разработке технических требований на надежность программного обеспечения следует принимать во внимание следующие критерии:

1. *Корректность программного обеспечения* — число серьезных ошибок в индивидуальном программном пакете и время, необходимое для их исправления. Возможно, это должно быть связано с разработкой подробной шкалы приоритетов, которая охватывает признаки, наблюдаемые пользователем, и принимает во внимание возможности преодоления возникших трудностей.

2. *Обслуживаемость системы* — влияние ошибок программного обеспечения на обслуживаемость системы. Как указывалось ранее, очень трудно дифференцировать источник ошибок — аппаратура или программное обеспечение, поэтому необходимо задавать общий критерий обслуживаемости системы.

3. *Безотказность системы* — частота системных (или подсистемных) отказов, вызываемых ошибками программного обеспечения. Здесь снова возникает проблема дифференциации ошибок между аппаратурой и программным обеспечением.

С учетом сложившейся реальности при выборе критериев оценки надежности необходимо принимать во внимание следующее:

1) новое программное обеспечение может требовать в первое время менее жестких критериев и большего времени для его совершенствования;

2) на короткое время после выпуска новой версии программного обеспечения также могут потребоваться менее строгие критерии его качества;

3) разбросы, вызываемые различием в условиях применения и использования;

4) эффективность работ по исправлению ошибок программного обеспечения, проводимых производителем, зависит от воспроизводимости

ошибки, что в свою очередь зависит от информации, поступающей от пользователя;

5) возможны и другие требования, которые следует принять во внимание, например связанные с быстродействием и производительностью. Может случиться, что подобные критерии достигаются только за счет большего числа остающихся некорректностей или низкой безотказности и обслуживаемости системы.

Глава 6

ПРИЗНАКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

ПОСЛЕДСТВИЯ ОТКАЗОВ

До сих пор отказы рассматривались как отказы компонентов, события, исследования, сообщения об ошибке либо системные отказы. Системные отказы являются признаками или следствиями неисправностей или ошибок, но имеются и другие отказы, последствия которых могут быть более серьезные, такие как выдача ложного результата без какой-либо индикации этого или нарушение защиты данных, допускающее несанкционированный доступ к данным. Другие события, связанные с периферийными устройствами, могут вызвать разрушение носителя информации, в то же время существует много других событий, последствия которых менее серьезны, вызывающие лишь незначительные функциональные отклонения. Чтобы выявить возможные последствия различных событий, полезно рассмотреть признаки неисправностей.

НЕОБНАРУЖЕННЫЕ ОШИБКИ

Трудно получить достоверную информацию о том, как часто ЭВМ делает ошибки. Большинство зафиксированных событий, одна только печать которых обошлась бы в тысячи фунтов стерлингов, в основном вызваны ошибками в программах пользователей. Во время приемочных испытаний (см. гл. 10) проверяются результаты прогонки всех программ и выясняются источники ошибок. Анализ 100 таких испытаний для систем различного типа дал следующие данные по необнаруженным ошибкам (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Отказы, дающие необнаруженные ошибки

Устройство	Доля необнаруженных ошибок от всех ошибок соответствующего устройства, %
Центральный процессор	0–30
НМД и НМЛ	10–25
Устройство вывода на перфокарты	30–40
Устройство ввода с перфокарт и перфоленты	50–60
Печатающее устройство	60–70
Устройство вывода на перфоленту	80–90

Следует заметить, что программы, используемые для этих испытаний, предназначались для выявления определенного класса ошибок и не включали в себя программы комплексных проверок (например, проверок контрольных сумм), которые обычно включаются в реальные программы пользователя. Поэтому можно ожидать, что на практике доля необнаруженных ошибок окажется меньшей, чем приведенная в табл. 6.1.

Процессоры

Обычно в процессорах предусматриваются контроль четности с предсказанием четности в операциях с плавающей запятой и коды с исправлением ошибок оперативной памяти. При таком контроле приемочные испытания не зафиксируют никаких необнаруженных ошибок, хотя, конечно, вероятность их существует. Для больших ЭВМ, не имеющих контроля четности, до 30% неисправностей могут вызывать незафиксированные ошибочные результаты, причем в основном в операциях с плавающей запятой. Для мини-ЭВМ без контроля четности для памяти этих неисправностей также около 30%.

На рис. 6.1 приведена граница для появления максимального числа необнаруженных ошибок в зависимости от быстродействия процессора в тысячах команд в секунду. Область слева от границы охватывает все остальные случаи появления необнаруженных ошибок. Данные на рис. 6.1 взяты из гл. 11 и в предположении, что в 30% случаев ошибки не обнаружены. Согласно рис. 6.1 для ЭВМ с быстродействием 10 000 тыс. команд/с можно ожидать на 1000 ч 10 ошибочных результатов, или один ошибочный результат в неделю.

Полезно рассмотреть эту проблему и с других позиций. Число ошибочных результатов может быть подсчитано в числах событий на 10^{12} команд по следующей формуле:

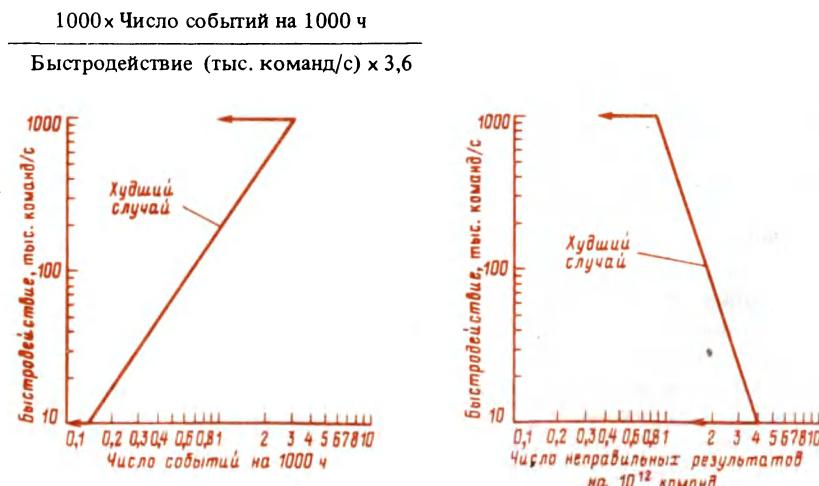


Рис. 6.1. Необнаруженные ошибки базовых конфигураций на 1000 ч

Рис. 6.2. Необнаруженные ошибки базовых конфигураций на 10^{12} команд

Новая зависимость показана на рис. 6.2. Первое наблюдение новой зависимости говорит, что более крупные процессоры с одними и теми же средствами встроенного контроля будут, вероятнее всего, делать меньше ошибок в работе заданного объема, несмотря на то что сделают эту работу много быстрее, чем менее мощные процессоры. Второе наблюдение состоит в том, что при числе ошибок на 10^{12} команд, равном 4 и менее, большие процессоры должны несомненно давать значительно меньше неправильных результатов, чем любая другая эквивалентная система с неавтоматическим обнаружением ошибок.

Последствия любых отказов зависят от того, носят они устойчивый, перемежающийся или случайный характер. Устойчивые неисправности могут вызывать ошибочные результаты сразу во многих программах (на рис. 6.1 и 6.2 они учитываются как 1 событие), но они рано или поздно обнаруживаются и подозреваемые участки перезапускаются.

Сбои тоже могут дать неправильные результаты, но эти результаты будут явными только в очень редких случаях.

Поскольку большинство событий вызывается перемежающимися отказами, то вероятнее всего, что неправильные результаты будут возникать на сравнительно коротких временных отрезках с длительными промежутками правильной работы. Поэтому задание интенсивности необнаруженных ошибок как их числа за 1 нед (как это сделано выше) не совсем корректно. Существуют другие отказы, которые дают неправильные результаты и которые вызывают либо завершение программы, например переполнением разрядной сетки, либо остановку системы.

Периферийное оборудование

Накопители на магнитных дисках. От 10 до 25% отказов в НМД ведут к ошибкам, которые остаются необнаруженными. Нижняя граница относится к случаю применения наиболее сложных проверяющих кодов. Это такие отказы, как считывание ошибочной записи или файла, запись неправильной информации с правильным кодом и иногда ложное ошибочное считывание. Некоторые из отказов были по вине контроллеров НМД, другие – из-за неправильной отладки механической части. На задачах, подобных проверочным испытаниям, при условии, что отложенные накопители на сменных магнитных дисках имеют 1 событие на 1000 ч на 1 драйвер (см. гл. 11), можно ожидать появления от 0,1 до 0,25 необнаруженных ошибок на 1000 ч работы. Эти значения близки к худшему случаю для небольших процессоров, что может свидетельствовать о возможновении ряда ошибок, вызванных отказами контроллеров НМД.

На типовых проверочных испытаниях загруженность НМД по передаче информации составляет 5%, т. е. для такого устройства с быстрым действием 300 Кбайт/с доля необнаруженных ошибок составляет от 1 необнаруженной ошибки на $1,7 \cdot 10^{12}$ бит до 1 необнаруженной ошибки на $4,3 \cdot 10^{12}$ бит.

Отметим, что при 5%-ной загруженности накопителя по передаче информации и типовой передаче, занимающей 3 мс, его оперативная загрузка из-за ожидания доступа реально составляет 30%.

Накопители на магнитных лентах. В НМЛ 10–25% отказов вызывают появление ошибок при считывании. В отличие от НМД накопители на магнитных лентах имеют автоматическое считывание после записи, однако это не спасает от появления необнаруженных ошибок.

При средней безотказности 2 события на 1000 ч на одно устройство при 2%-ном использовании по передаче информации и быстродействии 800 Кбайт/с интенсивность ошибок составляет от 0,2 до 0,5 необнаруженных ошибок на 1000 ч, или 1 необнаруженная ошибка на $(0,9 \div 2,3) 10^1$ бит. Обычно НМЛ работает совместно с программой, ожидающей исполнения, и оперативная занятость его составляет около 20%. Для накопителей на НМД, имеющих более низкую занятость, доля необнаруженных ошибок на 1000 ч была бы меньше.

Устройства вывода на перфокарты. На устройствах вывода на перфокарты 30–40% отказов вызывают ошибочную информацию, которая не обнаруживается считыванием после пробивки. Большинство из них вызваны плохой пробивкой отверстий, не воспринимаемых считающим устройством.

Устройства вывода на перфокарты имеют обычно очень низкую интенсивность использования с типовыми значениями безотказности 1,5 события на 1000 ч, интенсивность необнаруженных ошибок от 0,45 до 0,60 на 1000 ч. Как показано ниже, интенсивности необнаруженных ошибок составляют от 1 на 10^6 перфокарт до 1 на 10^7 перфокарт.

Устройства ввода с перфокарт. В устройствах ввода с перфокарт 50–60% отказов давали необнаруженные ошибки при считывании информации из-за двойного считывания столбца, перекоса при считывании или начала считывания с неправильного места. В отличие от других устройств здесь влияние на работу пользователя может быть не столь серьезным, например при считывании перфокарт на исходном языке перфокарты с ошибкой будут забракованы как кажущаяся программная ошибка. Устройство ввода с перфокарт имеет типовое значение интенсивности событий 2 события на 1000 ч или интенсивность необнаруженных отказов 1–1,2 на 1000 ч. При 10% занятости и считывании со скоростью 1000 перфокарт/мин интенсивность ошибок составляет 1 необнаруженную ошибку на $(5 \div 6) 10^6$ перфокарт.

Устройство ввода с перфоленты. Несмотря на контроль по четности, на некоторых устройствах ввода 50–60% всех отказов дают необнаруженные ошибки.

Эти устройства имеют безотказность 1 событие на 1000 ч или интенсивность необнаруженных ошибок $(0,5 \div 0,6) 1000$ ч при 1% загруженности во времени. При скорости 500 символов/с интенсивность ошибок составляет 1 необнаруженную ошибку на $(3 \div 3,6) 10^7$ символов.

Печатающие устройства. Многие из 60–70% неисправностей печатающих устройств, которые дают необнаруженные ошибки, вызваны искаложением символов, в частности их непропечаткой, что вызывает сомнения при чтении результатов человеком. Другие неисправности вызывают пропуск столбцов, иногда пропускаются отдельные символы или заменяются другими.

Безотказность печатающего устройства имеет типовое значение 5 событий на 1000 ч при 25%-ной загрузке или 3–3,5 необнаруженных ошибки на 1000 ч. При скорости печати 500 строк/мин и 30 символов в строке это дает 1 необнаруженную ошибку на $(6,4 \div 7,5) \cdot 10^7$ символов.

Устройства вывода на перфоленту. В устройствах вывода на перфоленту до 80–90% неисправностей вызывают ошибочную пробивку или смещение пробивок, что влечет за собой ошибочное считывание. На практике при наличии на ленте контрольных символов или сумм многие ошибки индицируются при считывании, но это не исключает ошибочного перфорирования. У ленточного перфоратора, как и у карточного, очень низкий уровень загрузки, и он имеет безотказность 1,4 события на 1000 ч, многие из которых, как показано выше, представляют необнаруживаемые ошибки.

Спецификации, задаваемые производителем

Часть производителей предусматривает в спецификациях ожидаемую интенсивность обнаруживаемых ошибок для некоторых периферийных устройств. При этом предполагается, что возникновение неблагоприятных граничных режимов в системе аппаратура – носитель информации рождает случайные ошибки, для которых не существует адекватного дефекта. Примеры ошибок такого рода для накопителей на НМД и НМЛ, устройств ввода с перфолент и перфокарт и вывода на них даны в табл. 6.2. Интенсивности необнаруженных ошибок различны для устройств разного типа и по-разному спроектированных, но в самом худшем случае (в устройствах вывода на перфоленту) они составляют от

Таблица 6.2. Интенсивности восстанавливаемых, невосстанавливаемых, обнаруживаемых и необнаруживаемых ошибок, гарантируемые изготовителем

Устройство	Интенсивность восстанавливаемых ошибок	Интенсивность невосстанавливаемых ошибок	Интенсивность необнаруживаемых ошибок
Накопитель на магнитных лентах с фазовым кодированием	1 ошибка на 10^7 бит (исправляется корректирующим кодом), 1 ошибка на $2,5 \cdot 10^8$ бит (восстанавливается программно)	1 ошибка на $2,5 \cdot 10^{11}$ бит	1 ошибка на 10^{13} бит
Накопитель на магнитных лентах с инверсным кодом без возврата к нулю	От 1 ошибки на $5 \cdot 10^7$ бит до 1 ошибки на 10^8 бит	От 1 ошибки на 10^9 бит до 1 ошибки на 10^{11} бит	1 ошибка на 10^{13} бит
Накопители на магнитных дисках и барабанах	От 1 ошибки на 10^9 бит до 1 ошибки на 10^{10} бит	От 1 ошибки на 10^{11} бит до 1 ошибки на 10^{13} бит	–
•	Интенсивность обнаруживаемых ошибок		

Табл. 6.2 (продолжение)

Устройство	Интенсивность восстанавливаемых ошибок	Интенсивность невосстанавливаемых ошибок	Интенсивность необнаруживаемых ошибок
Устройство ввода с перфокарт	От 1 ошибки на 10^5 перфокарт до 1 ошибки на 10^6 перфокарт	—	От 1 ошибки на 10^6 перфокарт до 1 ошибки на 10^7 перфокарт
Устройство вывода на перфокарты	От 1 ошибки на 10^4 перфокарт до 1 ошибки на 10^5 перфокарт	—	От 1 ошибки на 10^6 перфокарт до 1 ошибки на 10^7 перфокарт
Устройство ввода с перфоленты (без контроля по четности)	—	—	От 1 ошибки на 10^6 символов до 1 ошибки на 10^8 символов
Устройство вывода на перфоленту	—	—	От 1 ошибки на 10^5 символов до 1 ошибки на 10^7 символов

$1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^7$ символов. Возможно, что многие из ранее рассмотренных событий вызваны превышением установленных в спецификациях допусков на значения параметров и не могут быть классифицированы как следствия отказов.

Система в целом

Взяв типовую систему автоматической обработки данных в предположении ее работы в том же режиме, что и при испытаниях, диапазон необнаруживаемых ошибок можно оценить от 10 до 17 на 1000 ч, или примерно 1 ошибка в неделю:

	Число необнаруживаемых ошибок на 1000 ч
Процессор 1000 тыс. команд/с	0–3,0
8 накопителей на магнитных лентах	1,6–4,0
6 накопителей на магнитных дисках	0,6–1,5
2 печатающих устройства	6,0–7,0
1 устройство ввода с перфокарт	1,0–1,2
1 устройство вывода на перфокарты	0,4–0,6
<hr/>	
	9,6–17,3

Снова подчеркнем, что распределение этих событий таково, что многие недели возможна беспроблемная работа, а затем за короткий отрезок времени возможен ряд ошибочных вычислений.

ПРИЗНАКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ, ФИКСИРУЕМЫЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ

В ежедневных записях признаков неисправностей, ведущихся пользователем, почти не найти признаков необнаруженных неисправностей, поскольку большинство из них влияет на исполнение индивидуальных про-

грамм, которые в соответствующий момент времени не проверяются. В последующих параграфах приведены подробные сведения о различных событиях, зафиксированных пользователями на ряде вычислительных систем и полученных обработкой свыше 2000 отчетов, составленных пользователями. В каждом параграфе приведена доля неисправностей, имеющих соответствующие признаки.

Процессоры

Индицируемые светом, %	11
Индицируемые сообщениями на пульте управления, %.	34
Вызывающие останов без индикации, %.	28
Зацикливание или другая, по-видимому, программная ошибка, %	25
Ошибочная загрузка данных, %	1
Бессмысленный текст, выданный пишущей машинкой, %	1

Указанные признаки меняются чрезвычайно сильно от ЭВМ одного типа к другому, зависят от проектных решений и средств контроля, заложенных в ЭВМ, но многие из них не дают адекватной индикации более чем для 50% отказов процессоров. Основные признаки, которые следует отметить, это те, которые вызваны, по-видимому, ошибками программного обеспечения, когда результат отдают пользователю для последующего анализа, а дежурный инженер даже не пытается выявить причину ошибки.

Периферийное оборудование

Накопители на магнитных дисках

Невосстанавливаемые ошибки считывания, %	38
Ошибки поиска трека, %	6
Другие индицируемые неисправности аппаратуры, %	13
Отказы в автономном режиме, %	18
Ошибочная выгрузка данных, %.	1
Ошибочная загрузка данных, %	24

В первых трех случаях дисковый пакет может быть перемещен для считывания на другое устройство, но информация, скорее всего, невосстановима и для регенерации информации нужна большая работа с существенными временными затратами.

Неисправности, вызывающие отказы в автономном режиме работы диска, не всегда ведут к серьезным отказам, пока пакет сохраняет свою целостность. В этом случае вся система обычно останавливается, и поскольку неисправное устройство отключается, программы должны быть перезагружены, а все работы перезапущены.

Для 4% неисправностей было зафиксировано повреждение считающей головки. Это самый тяжелый вид отказов в НМД, так как головка может задеть поверхность диска, повредиться сама и разрушить поверхность диска. Эти неисправности не только разрушают информацию, но и вызывают нарушения в механизме перемещения головки такие, что любой другой дисковый пакет на этом месте получает механические повреждения. В свою очередь пакет с повреждениями, установленный на другом блоке памяти, вызывает повреждение считающей головки. Для неис-

правностей последнего типа известно повреждение 12 дисковых пакетов и считывающих головок, обошедшееся в 2000 фунтов стерлингов.

Современные НМД имеют емкость 200 Мбайт и скорость обмена 800 Кбайт/с. При интенсивности событий 1 событие на 1000 ч, при 38% отказов, дающих невосстанавливаемые ошибки, и средней загрузке 2,5% подсчет интенсивности невосстанавливаемых ошибок дает 1 невосстанавливаемую ошибку на $1,5 \cdot 10^{12}$ бит. Это значение совпадает с типичными требованиями производителей, приведенными в табл. 6.2.

Тем не менее подсчитанная ранее интенсивность необнаруживаемых ошибок ненамного ниже. По-видимому, это следствие доминирующего характера этого типа отказов при испытательных прогонах или просто отражение того факта, что контроллер НМД должен давать большую долю необнаруживаемых ошибок.

Помимо невосстанавливаемых ошибок, о которых речь шла выше и которые фиксируются оператором, возникает довольно много ошибок, поддающихся восстановлению, которые записываются в системном журнале регистрации ошибок (если, конечно, он предусмотрен в системе). В журнале записывается число ошибок, восстановленных повторным считыванием, повторным смещением головок или восстановленных корректирующим кодом. Мерой интенсивности невосстанавливаемых и восстанавливаемых ошибок может быть число обращений к вводу-выводу. Для НМД емкостью 200 Мбайт средние данные следующие. Число обращений к вводу-выводу на невосстанавливаемую ошибку $5 \cdot 10^6$, на восстанавливаемую ошибку $6 \cdot 10^3$.

Накопители на магнитных лентах

Невосстанавливаемые ошибки считывания и записи, %	22
Восстанавливаемые ошибки, %	3
Другие индицируемые отказы аппаратуры, %	26
Неисправности в автономном режиме, %	8
Ошибочная перемотка или выгрузка данных, %	9
Ошибочная загрузка данных, %	30
Наблюдаемые оператором механические дефекты, %	2

Следствием большинства из этих отказов становится вызов специальной программы, записанной на перфокартах, для завершения работы и иногда восстановление информации на ленте (45% невосстанавливаемых ошибок было при считывании). Большинство из 30% ошибочных загрузок данных не очень страшны по своим последствиям, но математическое обеспечение ряда систем затрудняет переход с одной установки на другую. Неизвестное число событий, по-видимому, происходит из-за ошибок оператора при загрузке или из-за отказов носителя информации — это уже ставшая стандартной отговорка некоторых инженеров на любые трудности работы с лентами. В 11% случаев, в основном при загрузке или при перемотке и выгрузке, обрывалась лента.

Для современных НМЛ, загруженных 0,5% времени работы системы, также как и для дисков, может быть подсчитана интенсивность невосстанавливаемых ошибок: 1 невосстанавливаемая ошибка на $5 \cdot 10^{10}$ бит.

Это величина того же порядка, что и в табл. 6.2. Но интенсивность необнаруженных ошибок, приведенная ранее, значительно выше, чем

приведенная в табл. 6.2, что можно объяснить отказами контроллера ленты или соответствующим состоянием блоков накопителя во время проведения приемочных испытаний.

Ниже приведены другие статистические данные для накопителей на магнитной ленте некоторого производителя:

Накопитель с фазовым кодированием	3–4 невосстанавливаемых ошибки на миллион записей по 4 Кбайт
Накопитель с кодированием инверсным кодом без возврата к нулю . . .	10–15 невосстанавливаемых ошибок на 1 млн. записей по 4 Кбайт

Эти данные дают диапазоны интенсивности невосстанавливаемых ошибок от 1 ошибки на $8 \cdot 10^9$ бит до 1 ошибки на $1 \cdot 10^{10}$ бит для фазового кодирования и от 1 ошибки на $2 \cdot 10^9$ бит до 1 ошибки на $3 \cdot 10^9$ бит для инверсного кода без возврата к нулю. Эти значения несколько выше, чем ранее вычисленные. Для накопителей с фазовым кодированием эти значения значительно выше, чем представленные в табл. 6.2.

Соотношение интенсивностей невосстанавливаемых и восстанавливаемых ошибок для современных НМЛ например следующее: число обращений к вводу-выводу на невосстанавливаемую ошибку $1 \cdot 10^6$, на восстанавливаемую ошибку $2 \cdot 10^3$.

Печатающие устройства

Ложная печать, %	28
Отказы из-за ленты, %	12
Отказы в подаче бумаги, %	19
Другие индицируемые отказы аппаратуры, %	9
Отказы в автономном режиме, %	5
Ошибки в размещении текста, %	8
Неправильная укладка бумаги, %	10
Ошибки оператора при регулировках, %	2
Недопустимый шум в работе, %	6
Запах гари, %	1

Существуют необнаруживаемые ошибки, которые тем не менее может увидеть оператор, как, например, пропуск целого столбца, постоянное смещение символов и слабая пропечатка из-за плохой ленты. Проблемы с укладкой бумаги для распечатки результатов счета действительно доставляют много хлопот, поскольку практически ни одно печатающее устройство не способно укладывать бумагу без каких-либо неприятных происшествий.

Устройство ввода с перфокарт

Индцируемое ошибочное считывание, %	21
Нарушение в подаче карт, %	50
Повреждение карт, %	14
Ошибки в размещении информации, %	7
Отказы в автономном режиме, %	8

Две трети всех проблем с перфокартами происходят во время их обработки, вызывая отказы в подаче или повреждения перфокарт, причем последние особенно неприятны, поскольку разрушают входные данные.

Ожидаемая интенсивность обнаруживаемых ошибок дана в табл. 6.2 – 1 ошибка на 10^5 – 10^6 считанных перфокарт. Из этой таблицы видно, что повреждения и нарушения подачи перфокарт случаются в 3 раза чаще, чем ошибочное считывание.

<i>Настольные печатающие машины</i>	<i>Устройства для считывания с перфолент</i>
Ошибка в печати, %	40
Отказы в подаче бумаги, % ..	7
Стопорение, %	33
Неисправности клавиш, % ..	13
Недопустимый шум, %	7
Инициируемые ошибки считываия, %	17
Отказы в подаче ленты, % ..	33
Стопорение, %	50

Устройства вывода на перфоленту и перфокарты. Поскольку эти устройства имеют низкий коэффициент использования, то данных об их отказах очень мало, но приблизительно события можно разбить на три равные группы: ошибки в перфорации, разрушение носителя информации, стопорение.

ПРИЗНАКИ ОШИБОК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для получения информации о признаках ошибок программного обеспечения был проведен подробный анализ, основанный на данных одного изготовителя. Возможно, что относительная частота появления ошибок программного обеспечения в этих данных не похожа на то, что наблюдает пользователь системы, поскольку один конкретный отказ может давать множество событий, а другие отказы – очень мало. Кроме того, при отказах программного обеспечения и серьезных проектных ошибках пользователь обычно не сообщает о каждом случившемся событии, тем более если отказ опубликован в выпуске об обнаруженных ошибках. Есть еще одно отличие отказов программного обеспечения от аппаратурных отказов, состоящее в том, что для некоторых заявленных отказов поставщик охотнее идет на изменение спецификации, чем на поиск отказа.

Управляющая часть операционной системы

Ниже представлены данные о распределении ошибок различных категорий:

Авария системы, %	26
Аварийный отказ прикладного программного обеспечения, %	3
Программные ошибки пользователя, %	13
Уничтожение данных, %	4
Нарушение защиты данных, %	2
Снижение производительности, %	2
Потеря функциональных возможностей, %	50

1. *Авария системы* включает такие признаки, как зацикливание, останов системы без какой-либо индикации, печать сообщений о системных ошибках, ошибки, при которых программы должны быть перезагружены, например чтобы перекоммутировать периферийное оборудование.

2. Аварийный отказ прикладного программного обеспечения останавливает не систему в целом, а только один из ее модулей или пакетов, который должен перезагружаться.

3. Программные ошибки пользователя — это те, которые вызывают неудачное завершение работы пользователя, зависание задачи в системе (и потерю задачи, если оператор не заметил этого) либо требование чрезмерных ресурсов.

4. Уничтожение (искажение) данных представляет отказы, вызывающие потерю данных и как следствие неправильные выходные результаты.

5. Нарушение защиты данных открывает пользователю несанкционированный доступ к некоторым файлам либо ошибочно закрывает ему доступ к файлам.

6. Снижение производительности вызывается такими ошибками, как выделение лишних ресурсов или замедление ввода-вывода.

7. Потеря функциональных возможностей (вызываемая 50% отказов). Вообще говоря, этих ошибок можно избежать при условии, что пользователь знает об их существовании, но в некоторых случаях, если пользователь не подозревает их появление в системе, они могут давать неправильные выходные результаты или другие программные ошибки. Ошибки, вызывающие потерю функциональных возможностей, более точно представлены в следующих данных:

Выполнение команд и процедур в программах пользователя, %	12
Управление заданиями или команды оператора, %	8
Форматы ввода – вывода, %	7
Неправильные или искаженные сообщения, %	1
Выполнение операций, %	3
Другие, %	5

Компиляторы и ассемблер

Большинство отказов этих пакетов программ может быть преодолено при условии, что пользователь знает об их существовании. Однако если он этого не знает, то последствия могут быть весьма серьезными:

Авария пакета программ, %	8
Неправильная обработка выражений, %	29
Неправильное распознавание неисправности, %	10
Неточные результаты, %	5
Неправильные форматы ввода-вывода, %	16
Некорректные или ложные сообщения об ошибке, %	24
Другие, %	8

За исключением аварий пакетов программ, ложных сообщений об ошибках и нескольких ошибок из категории "другие", остальные ошибки влияют на ход выполнения программ и вызывают ложные ошибки, неправильные результаты или ложные завершения программ. Могло бы показаться, что ложные ошибки и сообщения, возможно, не имеют серьезных последствий, однако любой программист вспомнит, сколько потеряно времени в поисках ложных ошибок в корректных программах.

ВРЕМЯ ПРОСТОЯ И ВРЕМЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ

ВРЕМЯ ПРОСТОЯ

Определение. При задании проектных характеристик надежности вычислительной системы возникают недоразумения, вызываемые различным толкованием терминов "среднее время между отказами" (см. гл. 1) и "среднее время ремонта". Обычно считают, что среднее время ремонта составляет примерно полчаса, однако на практике обнаруживается, что за этот промежуток времени в среднем проводятся лишь диагностирование и ремонт устойчивых отказов при условии, что инженер-ремонтник уже присутствует на месте функционирования системы вместе с необходимыми запасными частями. С точки зрения пользователя важной характеристикой является времяостоя при событии, которое можно разбить на следующие составные части:

1. *Время обработки программ на неисправной машине.* Совершенно не обязательно, чтобы неисправность, возникшая в вычислительной системе, проявилась немедленно, поэтому в течение некоторого *периода времени* (пока неисправность не будет замечена) система может производить неверные результаты. В других случаях неисправность может возникнуть во время выполнения программы, что приведет к преждевременному прекращению ее обработки и часть продуктивного времени будет потеряна впустую. В первом случае измерить время обработки программы на неисправной машине довольно сложно, и поэтому при определении временистоя пользователь может предпочесть указание времени повторной обработки, т. е. промежутка времени, прошедшего от окончания процедуры восстановления до успешного достижения того этапа обработки, на котором была замечена неисправность. Основная трудность при определении времени обработки программ на неисправной машине состоит в том, что существуют такие задачи, которые требуют от пользователя применения средств рестарта с контрольной точки; поэтому пользователь обычно ограничивает времяостоя, отводя на время обработки программ на неисправной машине, например, 15 мин.

Другая ситуация, когда необходимо затратить дополнительное время на повторное выполнение программ, связана с обнаружением факта потери ранее созданных файлов: так случается, когда некоторые записи данных невозможно считать либо из-за того, что возникшая неисправность привела к некорректной записи на носителе, либо вследствие физического повреждения носителя; в других случаях может быть искажен или утрачен каталог, в котором указано местоположение отдельных файлов. Время повторного создания файлов также зависит от области применения и может изменяться от нескольких минут (для восстановления магнитной ленты) до многих часов (для восстановления всех файлов на большом диске, поддерживаемом операционной системой). И снова пользователь обычно ограничивает времяостоя, отводя, например, на восстановление всех файлов не более 5 ч.

2. Начальное время простоя. При возникновении неисправностей, оказывающих влияние на функционирование системы, всегда проходит некоторое конечное время между моментом, когда оператор замечает неисправность, и его обращением к инженеру или переходом к процедуре восстановления; это время может быть затрачено на проведение известных процедур прекращения работы (перевода системы в неактивное состояние), попытки автоматического восстановления, автоматические диагностические процедуры или аварийный вывод содержимого памяти или на анализ оператором сигнальных ламп, расположенных на пульте, регистрацию отказа и на то, чтобы оператор удостоверился, что он не ошибся.

3. Время ожидания. Даже в тех случаях, когда инженер-ремонтник присутствует на месте функционирования системы, очень редко случается, чтобы он находился в непосредственной близости к машине, ожидая сообщения о возникновении отказа, а если система обслуживается по вызову, то до появления инженеров-ремонтников может пройти несколько часов (или дней, если сообщение получено накануне выходного дня). Время ожидания увеличивается, если инженер не имеет под руками необходимых запасных частей или если он вызван для оказания помощи или проведения консультаций.

4. Время исследования. Этот показатель учитывает время загрузки и выполнения испытательных программ, попыток устранения отказа и повторного выполнения испытательных программ с тем, чтобы убедиться, что ремонт действительно произведен. При возникновении устойчивых отказов, если запасные части имеются в наличии, среднее время ремонта не превосходит 0,5 ч. Если отказ является перемежающимся, то испытательные программы, воспроизводящие условия его проявления, выполняются в среднем около 30 мин, а после попытки устранения отказа должны быть повторены в течение того же периода; после этого может последовать новая попытка устранения отказа и еще одно повторение испытательной программы, и так будет повторяться до тех пор, пока неисправность не пропадет или не будет устранена. Поэтому среднее время исследования значительно, и если принимать во внимание число попыток устранения отказа, то истинное среднее время ремонта становится очень большим.

5. Время восстановления. Если инженер по ремонту передает систему пользователю или пользователь принимает решение запустить систему без привлечения инженера, то время восстановления затрачивается на перегрузку программного обеспечения и прикладной программы и ее выполнение; этот период может длиться от 1 мин до 0,5 ч в зависимости от типа системы.

Если время простоя определяется пользователем, то чаще всего к простому относится время от первого наблюдения отказа до нового запуска системы, вычисляемое по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Начальное время простоя} + \text{Время ожидания} + \text{Время исследования} + \\ + \text{Время восстановления}, \end{aligned}$$

причем время обработки программ на неисправной машине во внимание не принимается. Производитель, определяющий время простоя, обычно

учитывает время исследования и может не принимать во внимание часть времени ожидания. При рассмотрении характеристик безотказности и времени простоя очень важно, чтобы сравнение характеристик проводилось корректно.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ПРОСТОЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Для центрального процессора, характеристики безотказности которого приведены в табл. 1.4, полное время простоя могло бы быть равно 550 ч, причем 150 исследований заняли бы 375 ч, а 350 отказов системы потребовали бы дополнительные 175 ч (сюда входит время обработки программ на неисправной машине); корректное сравнение этих характеристик проводится в табл. 7.1. Обычно производители указывают наработку на отказ компонента, сравнимую со средним временем исследования, и лишь немногие из них признают, что среднее время, потерянное при возникновении отказа, может быть 10 ч и более. С другой стороны, следовало бы снова указать на действие перемежающихся неисправностей, поскольку при среднем времени простоя при устойчивой неисправности, равном 2 ч, 25 устойчивых неисправностей приводят к 50-часовому простою, а 25 перемежающихся – к 500-часовому; иначе говоря, более 90% времени простоя является результатом появления перемежающихся неисправностей.

Таблица 7.1. Отказы и время простоя

Класс явлений	Тип наработки на явление	Длительность наработки, ч	Интенсивность простоев	Длительность простоев, ч
Отказы, наблюдаемые пользователем (350 отказов, 550 ч простоев)	Наработка на системное прерывание	28,6	Среднее время простоев на событие	1,57
Исследования, выполняемые инженером (150 исследований, 375 ч простоев)	Наработка на исследование	66,7	Среднее время исследования	2,5
Действительные отказы: 50 отказов, 375 ч простоев 50 отказов, 550 ч простоев	Наработка на отказ компонента	200	Истинное среднее время ремонта Среднее время простоев на отказ	7,5 11,0

Чтобы еще раз подчеркнуть важность правильного понимания времени простоев и указать, какое значение имеет ремонтопригодность системы, в следующих параграфах представлены реальные распределения времени простоев для различных систем, поставляемых разными производителями.

ВРЕМЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Малая вычислительная машина

На рис. 7.1 приведена гистограмма, отражающая распределение исследований по их длительности, для ряда однотипных малых процессоров. Системы обслуживаются инженерами-ремонтниками, присутствующими на месте функционирования систем и имеющими под руками полный набор запасных частей. Оборудование не обладает высокой ремонтопригодностью, детальный анализ показывает, что в среднем на неисправность приходится около двух исследований. Можно считать, что в распределении отражено некоторое число обычных исследований со средней длительностью 2 ч и несколько расширенных, во время проведения которых устанавливается, что имеющиеся в распоряжении инженеров-ремонтников запасные части неисправны, т. е. требуются затраты времени ожидания, или инженеры нуждаются в помощи для устранения сложных неисправностей, что также ведет к затратам времени ожидания; последнее особенно заметно в случае, когда пользователь не хочет продолжать работу до тех пор, пока неисправность не будет выявлена. Для сравнения этой системы с другими в табл. 7.2 приводятся распределения исследований по их длительности для различных систем; здесь же указано, что истинное среднее время ремонта рассмотренного процессора равно почти 5 ч.

На рис. 7.2 приведено аналогичное распределение для другой малой вычислительной машины, обладающей, по-видимому, несколько лучшей ремонтопригодностью, чем первая, но обслуживаемой по вызову, причем инженеры-ремонтники привозят соответствующие запасные части с собой; начальное время ожидания инженеров-ремонтников не учитывается. При обслуживании этой системы инженеры-ремонтники затрачивают несколько больше времени на установление причины отказа, пытаясь избежать повторного вызова, поэтому нормальное среднее время исследования равно 2,43 ч. Число устойчивых неисправностей и уровень ремонтопри-

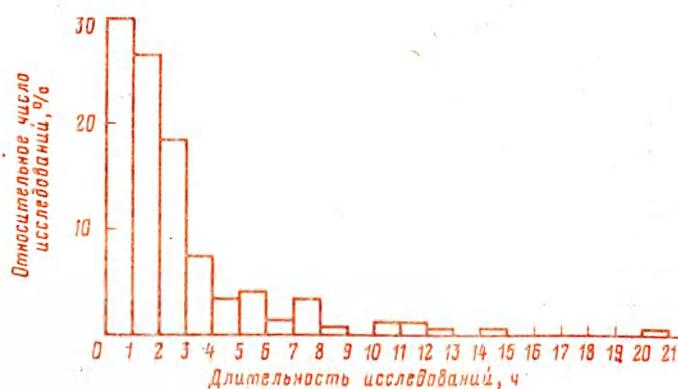


Рис. 7.1. Распределение времени исследований для малого процессора A.
Среднее время исследования 2,48 ч

Таблица 7.2. Данные о времени исследования для различных процессоров

Тип процес-сора	Число иссле-дований на отказ	Относительное число ис-следований, %, длитель-ностью					Среднее время иссле-дования, ч	Истинное среднее время ремон-та, ч	Среднее вре-мя исследо-вания без учета иссле-дований длитель-ностью свыше 8 ч
		0—1 ч	1—4 ч	4—8 ч	свыше 8 ч				
A, малый (рис. 7.1)	2,0	30	52	12	6	2,48	4,96	2,0	
B, малый (рис. 7.2)	1,75	18	45	17	20	4,0	7,0	2,43	
C, мини (рис. 7.3)	1,5	18	63	13	6	2,75	4,12	2,2	
D, большой (рис. 7.4)	5,0	70	23	5	2	1,21	6,05	1,0	
E, большой (рис. 7.5)	2,0	38	40	13	9	2,85	5,7	1,73	

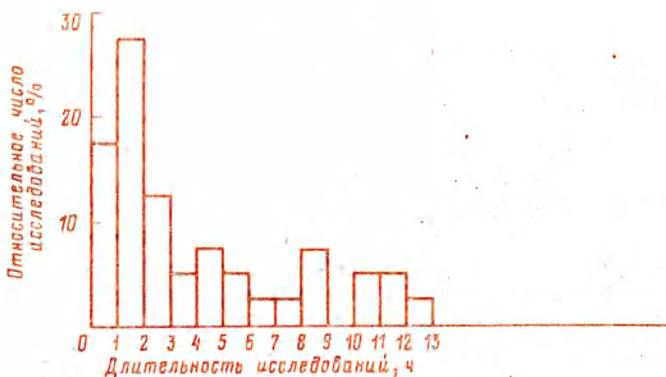


Рис. 7.2. Распределение времени исследований для малого процессора B.
Среднее время исследования 4,0 ч

годности отражены меньшим числом исследований длительностью до 1 ч; если, проанализировав признаки отказа, сообщенные оператором, инженер привезет с собой нужные запасные части, то все устойчивые неисправности должны устраниться менее чем за 1 ч, и если 50% отказов являются устойчивыми, то при среднем числе исследований на отказ, равном 1,75, по крайней мере 28% исследований продолжаться менее 1 ч. Тот факт, что 20% исследований продолжаются свыше 8 ч (см. табл. 7.2), связан с тем, что инженер привозит с собой не те детали, которые потребуются ему при ремонте.

Мини-ЭВМ

На рис. 7.3 приведено распределение исследований по их длительности для мини-ЭВМ, также обслуживающей по вызову, однако на этот раз инженер-ремонтник обычно привозит с собой полный набор запасных частей,

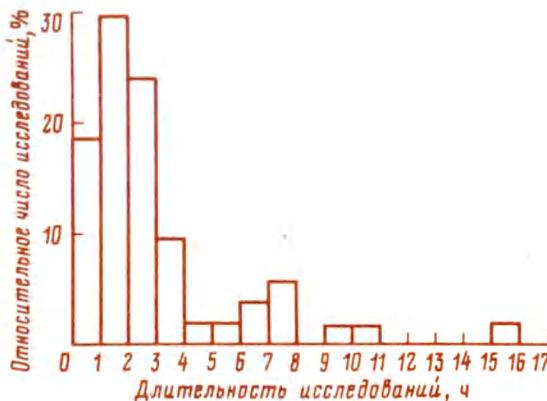


Рис. 7.3. Распределение времени исследований для минипроцессора С.
Среднее время исследования 2,75 ч

что не составляет трудности, поскольку в процессоре около десятка различных монтажных плат. Эта система обладает более высокой ремонтопригодностью, чем предыдущая, и следующими характеристиками: 1,5 исследования на отказ, обычное среднее время исследования 2,2 ч (см. табл. 7.2); малая доля исследований с длительностью до 1 ч объясняется тем, что далеко не все отказы являются устойчивыми. При наличии полного набора запасных частей лишь 6% исследований продолжаются свыше 8 ч. Хотя, как и в других рассмотренных системах, приведенные значения времени отражают только время, проведенное инженером на месте функционирования системы, он может отсутствовать несколько дней в ожидании необходимых запасных частей.

Большая вычислительная машина

На первый взгляд большой процессор обладает идеальным временемостоя (рис. 7.4). Действительно, большинство исследований занимает менее 1 ч, только 2% исследований продолжается более 8 ч, и среднее время исследования составляет 1,21 ч. Однако это впечатление обманчиво, поскольку ремонтопригодность системы низка, на отказ требуется 5 исследований, а основная часть кратковременных исследований состоит только в проверке и регистрации световой индикации, которая отражает состояние вычислительной машины. Истинное среднее время ремонта процессора равно 6,05 ч (см. табл. 7.2) и поддерживается на этом уровне только благодаря наличию на машине полного комплекта запасных частей и более высокой квалификации штата инженеров-ремонтников. Следует отметить, что хотя полное время исследования незначительно, система

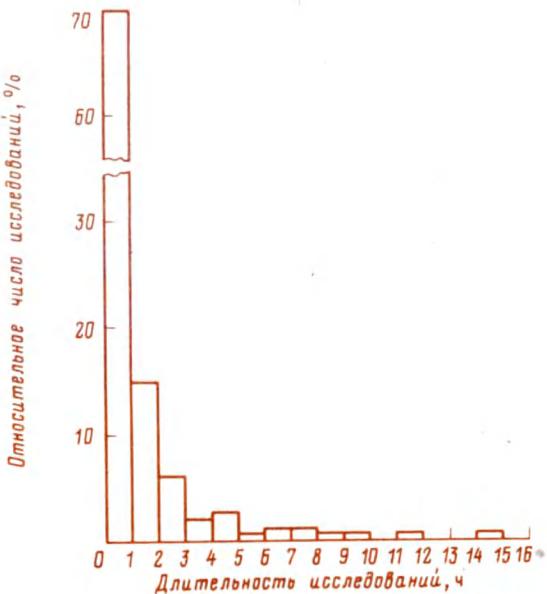


Рис. 7.4. Распределение времени исследований для большого процессора D.
Среднее время исследования 1,21 ч

подвергается частым системным отказам, что приводит к увеличению времени восстановления, не учтенному в распределении исследований на рис. 7.4.

На рис. 7.5 приведено распределение времени исследований для другого большого процессора, обслуживаемого инженерами-ремонтниками,

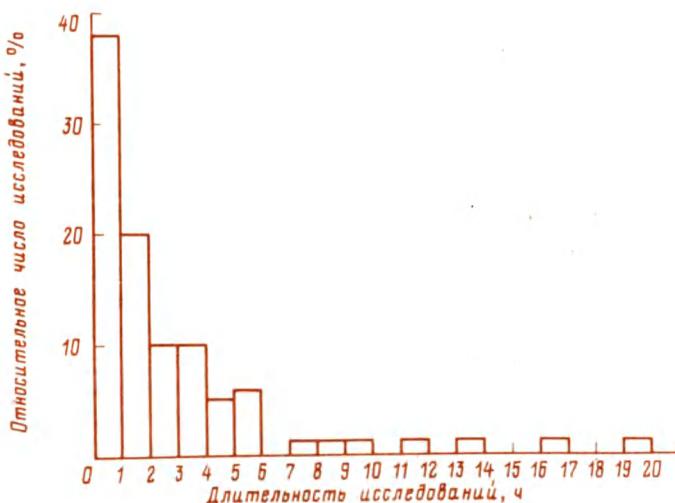


Рис. 7.5. Распределение времени исследований для большого процессора E.
Среднее время исследования 2,85 ч

находящимися на месте функционирования системы; число исследований на отказ равно двум. Обычное среднее время исследования довольно мало (1,73 ч), и большая часть исследований длится менее 1 ч. Эти характеристики ухудшены из-за длительных исследований сложных отказов и трудностей, связанных с отсутствием необходимых запасных частей.

Ремонтопригодность и отказоустойчивость этой системы выше, чем кажется на первый взгляд, поскольку наличие встроенных средств позволяет системе продолжать функционирование при наличии в ней неисправностей или автоматически восстанавливать работоспособность после сбоев. При возникновении таких неисправностей есть возможность проводить ремонт во время периодов планового обслуживания, причем эти временные затраты не отражены на рис. 7.5. Если же рассматривать все неисправности, то указанные средства сокращают истинное число исследований на отказ во время работы пользователя до значения более низкого, чем 2 (см. гл. 9).

Периферийное оборудование

Обычное время исследования периферийного оборудования почти всегда колеблется в пределах от 1,5 до 2,5 ч, что почти совпадает с аналогичным показателем для процессоров, указанным в табл. 7.2. Полное среднее время исследования обычно изменяется от 1,5 до 4 ч, однако этот показатель в отдельных системах через длительный период может возрастать до 20 ч и более вследствие отсутствия исправных запасных частей.

ВРЕМЯ ПРОСТОЕВ, НАБЛЮДАЕМЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ

При каждом исследовании пользователь наблюдает некоторый дополнительный простой вычислительной системы, длительность которого складывается из начального времени простоя, времени ожидания, времени восстановления и времени обработки программ на неисправной машине. Те же виды простоев наблюдает пользователь и при возникновении событий, когда инженер-ремонтник отсутствует или пользователь принимает решение продолжать работу без вмешательства инженера.

Сумма начального времени простоя и времени восстановления обычно изменяется в пределах от 5 мин до 0,5 ч и более в зависимости от возможностей конкретной системы. Минимальное время при простоях этих видов колеблется от нескольких секунд до 15 мин и более, однако среднее его значение увеличивается вследствие возникновения необходимости в консультации для инженера по отдельным вопросам или расширенной процедуры восстановления.

Время ожидания (не включаемое во время исследования) складывается из времени ожидания прибытия инженера и задержки, возникающей при отсутствии необходимого резерва. Время ожидания очень сильно зависит от способа обслуживания; при обслуживании по вызову можно получить гарантии или стремиться к тому, чтобы время реакции на любой запрос изменилось от 2 до 24 ч.

Реальное среднее время ожидания, по-видимому, несколько меньше гарантированного времени реакции инженеров-ремонтников, если система установлена в географически удобном для инженеров месте. Кроме того, так как большинство отказов являются перемежающимися, пользователь старается продолжить попытки восстановить систему во время ожидания, однако такой подход увеличивает число наблюдаемых событий.

Время ожидания помоши специалиста отражено в стратегии обучения инженеров по техобслуживанию, применяемой неким производителем:

обычные инженеры обучены поиску 85% отказов; инженеры, занятые установкой и поддержкой системы, обучены поиску 95% отказов; оставшиеся отказы, которые требуют обращения к производителю или автору разработки, составляют 5%.

Таким образом, для устранения 15% отказов инженерам требуется некоторая помощь или советы, что отнимает определенное время, поскольку соответствующие специалисты обычно редки и немногочисленны.

Распределение

В табл. 7.3 указана длительность простоев, зафиксированных пользователями для пяти процессоров, характеристики которых приведены в табл. 7.2.

Процессор A. Время ожидания включается во время исследования, и инженеры исследуют каждое событие. Зарегистрировано, что восстановление требует дополнительно 5 мин.

Таблица 7.3. Типичное время простоев различных процессоров

Система и вид обслуживания	Исследования			
	Среднее время исследования, ч	Среднее время ожидания, ч	Число исследований на отказ	Среднее время исследования на отказ, ч
A (на месте)	2,48	0	2,0	4,96
B (по вызову)	4,0	1,25	1,75	9,19
C (по вызову)	2,75	5,0	1,5	11,62
D (на месте)	1,21	0,10	5,0	6,55
E (на месте)	2,85	0	2,0	5,7

Система и вид обслуживания	Начальное время простоев и время восстановления		Полное среднее время простоев, ч		
	Среднее время простоев, ч	Число событий на отказ	Среднее время простоев на отказ, ч	На события, ч	На отказ, ч
A (на месте)	0,08	2,0	0,16	2,56	5,12
B (по вызову)	0,15	5,25	0,79	1,90	9,98
C (по вызову)	0,25	6,0	1,5	2,19	13,12
D (на месте)	0,25	14,0	3,3	0,72	10,05
E (на месте)	0,17	5,0	0,85	1,31	6,55

Процессор В. Время ожидания достаточно велико, и пользователь готов смириться с возникновением 3 событий на исследование или 5,25 событий на отказ. Полное среднее время простоя составляет почти 10 ч на отказ или 1,9 ч на событие.

Процессор С. В мини-системах полное среднее время простоя на отказ становится более 13 ч, так как среднее время исследования при отказе превышает 4 ч (см. табл. 7.2) из-за увеличенного времени ожидания и в среднем возникает 4 события на исследование.

Процессор D. Выше доказано, что большую систему трудно обслуживать, но она обладает малым дополнительным временем ожидания. Основное время затрачивается на ожидание помощи специалиста. Полное число событий на отказ в этой системе равно 14, что приводит к среднему времени простоя на отказ 10 ч.

Процессор Е. Время ожидания включается в среднее время исследования. Допускаются дополнительные 2,5 события на исследование, но полное среднее время простоя на отказ составляет всего 6,5 ч. Однако, поскольку остальные отказы исследуются в периоды запланированного обслуживания, истинное среднее время простоя на отказ уменьшается.

Влияние ремонтопригодности

При вводе в эксплуатацию вычислительной системы с высокой ремонтопригодностью часто предполагается, что среднее время исследования, среднее время простоя на событие и полное время простоя на отказ сокращаются. Приведенные выше примеры показывают, что такое предположение не всегда верно. Обладая свойством ремонтопригодности, система может продолжать функционирование с автоматическим восстановлением при возникновении некоторых типов отказов, однако эти отказы могут легко обнаруживаться другими способами. Иначе говоря, только более сложные отказы приводят к простоям во время работы пользователей, причем время простоя может еще и увеличиваться вследствие сложности отказов в дополнительной аппаратуре, обеспечивающей наличие ремонтопригодности. Создается впечатление, что системами, имеющими низкое время простоя на событие, являются такие, при эксплуатации которых пользователи примиряются с большим числом событий, обходясь без вызова инженеров, или же системы со слабой ремонтопригодностью, в которых проводятся поверхностные исследования с тем, чтобы отметить, что "никакие неисправности не обнаружены".

Свойство ремонтопригодности подробно обсуждается в гл. 9, где показано, что ремонтопригодность не обязательно совместима с экономическими аспектами создания комплекта запасных частей, в результате чего время простоя некоторых рассмотренных выше систем с бесспорной высокой ремонтопригодностью увеличено по сравнению с временем простоя менее ремонтопригодных систем. И, наконец, возможны значительные простоя систем, обладающих высокой безотказностью и ремонтопригодностью (в качестве примера можно привести мини-систему С), в которых основной частью простоя является ожидание при обслуживании по вызову, приводящее к большому полному среднему времени простоя на отказ.

Время простоя системы

До сих пор изучались распределения времени простоя отдельных устройств системы. При изучении простоев на системном уровне следует по-прежнему учитывать характеристики процессора, однако кроме этого необходимо учитывать простои, вызванные выходом из строя периферийного оборудования и программного обеспечения. Если иметь в виду только те отказы, которые приводят к прекращению работы всей системы, то для программного обеспечения сумма среднего начального времени простоя и времени восстановления обычно имеет примерно те же значения, что и для процессора, т. е. изменяется в диапазоне от 5 до 30 мин. Такие же оценки справедливы и для отказов периферийного оборудования, вызывающих аварийные остановы системы, несмотря на то, что ряд систем может обладать недостаточным числом резервных периферийных устройств или неудовлетворительными испытательными программами, реализуемыми в процессе функционирования системы, что приводит к расширенным исследованиям, для проведения которых необходимо использовать процессор в специальном режиме.

В табл. 7.4 приведены данные о простоях для систем, содержащих в своем составе рассмотренные выше процессоры. Общей тенденцией является снижение среднего времени простоя на системное прерывание, причиной чего служат включение в рассмотрение периферийных устройств и программного обеспечения и значительное увеличение числа событий со средним временем простоя менее 1 ч.

Система A. Программное обеспечение довольно примитивно, резервные периферийные устройства отсутствуют. Инженер по ремонту исследует все события, возникающие по вине периферийных устройств.

Система B. В системе предусмотрены некоторые резервные периферийные устройства, поэтому иногда функционирование может продолжаться с неисправным периферийным оборудованием, что приводит к снижению времени простоя. Как и в следующей системе C, зарегистрировано незначительное число ошибок программного обеспечения, влияющих на работу всей системы в целом. Большое число событий с временем простоя менее 1 ч обусловлено, с одной стороны, двумя событиями на исследование, которые не привлекают внимания инженера, а с другой стороны — нали-

Таблица 7.4. Типичное время простоя различных систем

Система	Относительное число событий, %, приводящих к простоям длительностью				Среднее время простоя на системное прерывание, ч			
	0–1 ч	1–4 ч	4–8 ч	свыше 8 ч	Центральный процессор	Периферийное оборудование	Программное обеспечение	В целом
A	36	50	11	3	2,56	1,94	—	2,1
B	80	9	6	5	1,90	1,3	—	1,5
C	75	9	8	8	2,19	1,95	—	2,0
D	90	8,5	1	0,5	0,72	0,35	0,26	0,6
E	83	11	4	2	1,31	0,67	0,17	0,9

чием отказов периферийного оборудования, не вызывающих прерывания функционирования системы.

Система С. Как и в других мини-системах, здесь фактически отсутствуют резервные периферийные устройства, однако большое число событий с временем простоя менее 1 ч является результатом проведения процедур восстановления в периоды ожидания инженера-ремонтника. Данная система имеет наибольшее (по сравнению с другими) число событий, приводящих к простою системы более 8 ч. Этот факт является следствием наличия длительных исследований, а иногда и увеличенного времени ожидания.

Системы D и E. Программное обеспечение обеих систем обладает довольно установившимся уровнем качества, хотя все же основная часть событий небольшой длительности возникает по его вине. В состав систем также входит соответствующее число резервных периферийных устройств, что приводит к очень сильному снижению среднего времени простоев на событие для периферийного оборудования.

Характеристики систем *B–E* являются наиболее типичными, причем относительное число событий, приводящих к простою системы длительностью менее 1 ч, обычно составляет 75–90%, хотя может достигать 95% в первое время, когда основные отказы возникают из-за программного обеспечения. Приведенные распределения времени простоев не включают времени обработки программ на неисправной машине, которое могло бы увеличить на 0,25 ч и более среднее время простоев на системное прерывание.

ВРЕМЯ ПРОСТОЯ ПЕРИФЕРИЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Согласно табл. 7.3' среднее время исследования центральных процессоров составляет 1,2–4 и с учетом времени ожидания 1,3–7,75 ч. Среднее время исследования для периферийных устройств укладывается примерно в те же пределы, однако при учете времени ожидания среднее время исследования возрастает до 2,5–10 и иногда превышает даже 20 ч. Увеличение диапазона вызвано дополнительными временными затратами на ожидание запасных частей при отсутствии дорогостоящих двигателей и основных механизмов как на месте функционирования систем, так и на местных станциях ремонта. Время ожидания для периферийных устройств имеет тенденцию к возрастанию в тех случаях, когда есть резервные устройства, поскольку пользователи не слишком сильно настаивают на ремонте неисправных устройств.

ВРЕМЯ ПЛАНОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Время планового обслуживания часто задается для всех электромеханических периферийных устройств при проведении их профилактического обслуживания. Это время затрачивается на замену отдельных частей или регулировку перед началом функционирования оборудования, подвергшегося действию неисправности, вызванной износом или откло-

нением значений параметров от нормы. Очень немногие процессоры обладают вспомогательными средствами обслуживания для воспроизведения условий отказа, прежде чем отказ повлияет на результаты работы. Поэтому время планового обслуживания для процессоров обычно относят к периодам ремонтного обслуживания, несмотря на то, что профилактическое обслуживание следует проводить для таких механизмов, как вентиляторы и фильтры. Такое ремонтное обслуживание может назначаться в соответствии с информацией, зарегистрированной в системном журнале ошибок, либо инженеры могут использовать это время для попыток воспроизведения сбоев или перемежающихся неисправностей, о появлении которых сообщил пользователь.

Производители часто требуют, чтобы для целей планового обслуживания вся система в целом была переведена в специальный режим, в котором возможны выполнение любых необходимых испытательных программ и регулирование периферийных устройств. Обычные требования к плановому обслуживанию, устанавливаемые различными производителями, не имеют никакого отношения к размеру процессора или конфигурации системы и изменяются от 1 ч за неделю до 3 ч за 3 мес для мини-систем и от 2–4 ч за неделю до 4 ч за 2 мес для более крупных систем. Иногда на крупных конфигурациях систем одновременно с работой пользователей проводится дополнительное плановое обслуживание резервного оборудования. На более старых системах ежедневное плановое обслуживание занимало до 2,5 ч, однако такая практика, за некоторыми исключениями, ушла в прошлое, причем инициаторами ее исключения были пользователи. В отдельных случаях плановое обслуживание проводится скорее в случайные моменты времени, наступление которых определяется появлением отклонений в характере записей в системном журнале ошибок.

Время планового и профилактического обслуживания различных периферийных устройств приводится в табл. 7.5.

Таблица 7.5. Примеры планового и профилактического обслуживания различных периферийных устройств систем базовой конфигурации

Устройство	Время обслуживания, ч					
	за 1 нед	за 1 мес	за 2 мес	за 6 мес	за 1 год	в целом на 1000 ч
Устройство ввода с перфокарт	1,5	5,0				25,0
		3,0	3,0			8,0
Печатающее устройство	2,0	4,0	3,0			30,0
	1,3	1,3	2,5			17,3
Накопитель на сменных магнитных дисках	0,8	1,0	1,0			10,7
			0,5	2,5		1,2
Накопитель на магнитных лентах	0,5	2,0	3,8	1,2		11,9
		0,8	2,5	2,5		4,1
Пишущая машинка				3,0		1,0
Видеодисплей	—				1,8	0,3

ВРЕМЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Кроме планового обслуживания во всех системах есть необходимость в дополнительном обслуживании, во время которого система модифицируется, но длительность этих процедур невозможно запланировать заранее задолго до их проведения. Среднее время модификации обычно 1,5–2 ч, поэтому согласно данным, приведенным в гл. 3, для первого образца новой большой системы, имеющей 400 извещений об изменении за 1-й год эксплуатации, может потребоваться до 800 ч на дополнительное обслуживание. Распределение этого времени неравномерно и меняется от 160 ч в первый месяц до 30 ч в последний месяц. Ввод в систему новых модулей требует дополнительного времени для испытания процессора, а значительные изменения проводного монтажа требуют затрат времени, которые близки к времени исследования. Модификации также могут потребоваться и для периферийного оборудования, однако в больших системах их вносят в резервные периферийные устройства, переводя последние в автономный режим. В этих случаях может возникнуть необходимость в дополнительных временных затратах на испытания. Даже в более поздних системах, где начальные громоздкие усовершенствования произведены на стадии изготовления, все-таки дополнительное обслуживание занимает много времени и в совокупности с отказами, внесенными при изменениях, увеличивает общее время обслуживания. Время, необходимое для загрузки операционной системы пользователя при новой версии программного обеспечения и при новых введенных модулях, можно также считать временем дополнительного обслуживания.

Глава 8

КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБСЛУЖИВАЕМОСТИ И ГОТОВНОСТИ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Коэффициенты обслуживаемости и готовности обычно используются для отображения качества обслуживания в целом за некоторый промежуток времени.

Коэффициент обслуживаемости имеет вид

$$S = \frac{\text{Полезное время}}{\text{Полезное время} + \text{Времяостоя}},$$

причем полезное время включает в себя: продуктивное время; время, использованное на отладку программ или обучение оператора; время, потерянное вследствие ошибок оператора, программных ошибок или из-за отклонений параметров внешней среды от нормы, а также время работы машины в холостом режиме.

Коэффициент готовности иногда определяется так же, как коэффициент обслуживаемости, однако лучше определить коэффициент готовности иначе:

$$A = \frac{\text{Полезное время}}{\text{Полезное время} + \text{Время простоя} + \text{Время полного обслуживания}},$$

причем время полного обслуживания включает в себя время планового обслуживания и время дополнительного обслуживания (по модификации и усовершенствованию системы). В первом случае под термином "готовность" понимается "готовность системы в запланированное время".

В системе, предназначеннной для непрерывного функционирования, где полное обслуживание всей системы недопустимо, коэффициенты обслуживаемости и готовности равны. Можно доказать, что дополнительное обслуживание довольно обременительно, а полное обслуживание выполняется в заранее запланированные периоды; поэтому далее в этой главе мы не будем рассматривать коэффициент готовности. Однако большинство рассуждений и статистических выводов, приводимых ниже, в равной степени справедливо в отношении как коэффициента готовности, так и коэффициента обслуживаемости.

Коэффициенты обслуживаемости могут быть определены для отдельных устройств и для системы в целом, однако что касается неисправностей и времени простоя, то для одного и того же оборудования значения вычисленных коэффициентов могут отличаться, и при их сравнении следует быть весьма осторожным.

Первый коэффициент, который будем рассматривать, называется техническим коэффициентом обслуживаемости:

$$S_E = \frac{\text{Время обслуживания пользователей}}{\text{Время обслуживания пользователей} + \text{Время, затраченное на исследования}}$$

Разделив числитель и знаменатель этой дроби на число исследований за рассматриваемый период времени, получим

$$S_E = \frac{\text{Среднее время между исследованиями}}{\text{Среднее время между исследованиями} + \text{Среднее время исследования}},$$

или, разделив числитель и знаменатель указанной дроби на число неисправностей компонентов, находим

$$S_E = \frac{\text{Наработка на отказ}}{\text{Наработка на отказ} + \text{Истинное среднее время восстановления}}.$$

Подобным образом можно вычислить пользовательский коэффициент обслуживаемости S_U , в котором время простоя включает в себя время исследования, начальное время простоя, время ожидания и время восстановления, причем время обработки программ на неисправной машине можно включать или не включать во время простоя. Разделив числитель

и знаменатель S_U на число зафиксированных пользователем событий, получаем

$$S_U = \frac{\text{Наработка на событие}}{\text{Наработка на событие} + \text{Среднее время простоя на событие}}.$$

В табл. 8.1 приведены коэффициенты обслуживаемости для процессора, данные о котором приводились в табл. 7.1 (причем в дополнительной строке учтен 15-минутный период обработки программ на неисправной машине при каждом событии). Из таблицы видно, что коэффициент обслуживаемости одного и того же оборудования может изменяться от 94,8 до 96,4%.

Таблица 8.1. Коэффициенты обслуживаемости для процессора

Класс явлений	Наработка на явление, ч	Среднее время простоя на явление, ч	Коэффициент обслуживаемости
Отказы компонентов	200	7,5	$S_E = \frac{200}{200 + 7,5} = 0,964$
Исследования	66,7	2,5	$S_E = \frac{66,7}{66,7 + 2,5} = 0,964$
События, наблюдаемые пользователем	28,6	1,42 (без учета времени обработки программ на неисправном оборудовании)	$S_U = \frac{28,6}{28,6 + 1,42} = 0,953$
События, наблюдаемые пользователем	28,6	1,57 (с учетом времени обработки программ на неисправном оборудовании)	$S_U = \frac{28,6}{28,6 + 1,57} = 0,948$

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Первые вычислительные системы

В 50-х годах первые коммерческие вычислительные машины имели одно устройство ввода и одно устройство вывода, магнитный барабан или диск в качестве основного ЗВ (с возможностью совершения лишь одного действия в каждый момент времени на всех указанных устройствах), причем все программы использовали все оборудование, но какое-либо системное программное обеспечение полностью отсутствовало. В этих условиях коэффициент обслуживаемости отражал не только время простоя из-за отказов системы (все события вызывали прерывания), но также время простоя всего оборудования и потерю пропускной способности из-за отказов.

Следующие вычислительные системы имели уже НМЛ, некоторые из которых использовались как резервное оборудование в случае возник-

новения неисправностей. В этих системах можно было в каждый момент времени обрабатывать лишь одну программу, однако операции ввода-вывода частично совмещались с вычислениями. Для дальнейшего повышения пропускной способности медленные устройства ввода-вывода часто снабжались автономными преобразователями для запоминания информации на магнитной ленте, вводимой с перфокарт или предназначенной для вывода на печатающее устройство и т. д. Любое событие в периферийных устройствах приводило к увеличению времени простоя системы, которое, однако, было ограничено, если в наличии имелось запасное периферийное оборудование. В таких системах коэффициент обслуживаемости отражал время простоя минимальной конфигурации, необходимой для успешного выполнения заданий, и потери пропускной способности вследствие отказов, но никак не был связан с временем простоя всего оборудования. Для автономных преобразователей иногда определялись индивидуальные коэффициенты обслуживаемости.

Мультипрограммирование

Первые вычислительные машины 60-х годов уже имели основное программное обеспечение для создания режима мультипрограммирования, возможности которого сначала ограничивались обработкой одной головной программы, вводом данных на магнитную ленту для другой программы и выводом данных через магнитную ленту для третьей программы. В то время некоторые пользователи продолжали применять коэффициент обслуживаемости, вычислявшийся для минимальной конфигурации вычислительной системы, т. е. не отражавший потери пропускной способности во входных и выходных потоках. Тогда же для учета потерь пропускной способности начали применяться оценки качества обслуживаемости систем мультипрограммирования, где время простоя определялось в соответствии с числом программ, обработка которых аварийно прекращалась из-за возникновения отказов. В некоторых случаях при наличии достаточного резерва периферийного оборудования верхняя граница времени простоя вычислялась как сумма времени переключения оборудования и времени обработки программ при неисправном оборудовании с учетом числа неправильно обработанных программ. В более поздних системах с более разнообразными возможностями реализации режима мультипрограммирования некоторые оценки качества обслуживаемости при вычислении времени простоя включали постоянный коэффициент мультипрограммности, это помогало определить, какие программы обрабатывались в то время, когда неисправность периферийного оборудования повлияла на одну из них.

Весовые коэффициенты

В системах с достаточно обширными возможностями обеспечения режима мультипрограммирования, общее представление о потере пропускной способности искажается, когда разные отказы считаются равноценными независимо от того, на какие именно из обрабатываемых программ они влияют. Дополнительные искажения вносят средства, позволяющие

продолжать работу управляющей программы или выполнение отдельных программ при деградации вычислительной системы, т. е. при сокращении максимального комплекта оборудования, необходимого для поддержания наивысшей пропускной способности. По этой причине были разработаны методы весовых коэффициентов, состоявшие в следующем: для каждой единицы оборудования и управляющего программного обеспечения задавался весовой коэффициент, зависящий от конкретного применения и отражающий потери пропускной способности системы вследствие отказа соответствующей единицы оборудования. Кроме того, либо задавались стандартное время восстановления, включающее начальное время простоя, время восстановления и время обработки программ на неисправной машине, либо использовался стандартный коэффициент потерь времени при обработке программ на неисправной машине и задавались истинное начальное время простоя и время восстановления. Пример таких весовых коэффициентов приведен в табл. 8.2: для событий в процессоре, программном обеспечении и периферийных устройствах, исследование которых требует использования определенной части процессора, полное время исследования считается временем простоя (весовой коэффициент равен 1); стандартное время восстановления всех системных отказов задано равным 30 мин; предполагается, что система может продолжать функционирование, используя часть основной памяти, не занятой обслуживанием, хотя и с меньшей пропускной способностью, которая снижается, например, до 80% номинальной при отказе одного модуля памяти, поэтому время простоя берется с коэффициентом 0,2. Аналогичные весовые коэффициенты приведены для отказов периферийного оборудования, причем для некоторых из них, если в наличии имеется резервное оборудование для замены, считается, что пропускная способность не снижается

Таблица 8.2. Весовые коэффициенты и стандартное время восстановления для простой системы

Объект	Число устройств	Весовые коэффициенты при числе отказавших устройств					Стандартное время восстановления, ч
		1	2	3	4	5	
Центральный процессор	1	1,0					0,5
ОЗУ	4	0,2	0,5	1,0	1,0		0,5
НМД	5	0,1	0,2	0,7	1,0	1,0	0,3
НМЛ	5	0	0,1	0,3	0,5	1,0	0,2
Печатающее устройство	2	0,2	1,0				0,1
Устройство считывания с перфокарт	2	0	1,0				0,1
Пищащая машинка	1	1,0					0,2
Операционная система	1	1,0					0,5
Файловая система	1	1,0					5,0

(весовой коэффициент равен 0), а указанное в таблице стандартное время восстановления равно времени замены вышедшего из строя устройства на запасное; и, наконец, на восстановление системы развалов отведено 5 ч, если отказ привел к полной потере информации. Разновидность метода весовых коэффициентов может быть применена для выбора минимальной конфигурации системы: весовым коэффициентам придаются значения, равные только 0 и 1, это означает, что соответствующая система находится либо в рабочем, либо в нерабочем состоянии.

Более сложные методы оценки обслуживаемости позволяют точнее определить потери пропускной способности из-за отказов, а для некоторых сложных систем или систем с очень разнообразными возможностями вычисленные коэффициенты обслуживаемости становятся весьма искусственными. Кроме того, к недостаткам различных методов оценки следует отнести тот факт, что во внимание не принимается неэффективность программного обеспечения, являющаяся следствием, например, ошибок проектирования.

РАЗЛИЧИЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Различные методы измерения

Использование различных методов измерения коэффициентов обслуживаемости может привести к различным результатам, причем разброс результатов может быть даже больше, чем показано в табл. 8.1, и этот

Таблица 8.3. Коэффициенты обслуживаемости системы (за 1000 ч)

Учитываемое время простоя	Тип вычисляемого коэффициента обслуживаемости	Время простоя, ч	Значение коэффициента обслуживаемости, %
Время исследования отказов центрального процессора	Технический коэффициент обслуживаемости для центрального процессора	375	96,4
Время исследования оборудования (в том числе периферийного), вся система простоят	Технический коэффициент обслуживаемости для минимальной конфигурации системы	435	95,8
То же с учетом времени восстановления, времени обработки программ на неисправном оборудовании и т. д.	Пользовательский коэффициент обслуживаемости для минимальной конфигурации системы	685	93,6
То же с учетом времени простоя из-за отказов программного обеспечения	Пользовательский коэффициент обслуживаемости для минимальной конфигурации системы	860	92,1
	Коэффициент обслуживаемости системы с учетом мультипрограммности	910	91,7
	Коэффициент обслуживаемости системы, полученный методом весовых коэффициентов	960	91,2

факт может вызывать недоразумения при попытке сравнения разных систем. Пример такого разнообразия коэффициентов обслуживаемости, найденных с помощью разных методов, приведен в табл. 8.3 (рассматривается система, которой соответствует табл. 8.1), однако на этот раз коэффициент обслуживаемости изменяется от 91,2 до 96,4%. Разброс может быть и шире. Например, при использовании неосталженного программного обеспечения коэффициенты могут снизиться более чем на 10%. Мультипрограммный метод и метод весовых коэффициентов, как показано в таблице, приводят к естественному уменьшению коэффициента обслуживаемости примерно на 0,5%, хотя это уменьшение сильно зависит от конфигурации и выбранного интервала времени: например, если один модуль памяти, которому соответствует весовой коэффициент 0,2, в течение 20 ч в неделю неверно выполняет одиночную операцию сдвига, то разброс коэффициентов обслуживаемости может превысить 10%, если влияние этого отказа на пропускную способность оценивается большим весовым коэффициентом.

Разброс значений коэффициентов обслуживаемости

Как показано ранее, коэффициент обслуживаемости вычисляется по формуле

Наработка на явление

Наработка на явление + Среднее время простоя на явление

где явлением может быть событие, отказ или исследование. Из этой формулы следует, что в разных случаях могут быть получены одинаковые значения коэффициентов: при частых явлениях (мала наработка на явление) и малом времени простоя либо при редких явлениях (большая наработка на явление) и большом времени простоя. Это свойство отражено на рис. 8.1, где среднее время простоя на явление изменяется от 0,1 до 10 ч, а наработка на явление – от 1 до 1000 ч. На практике может быть получено одно и то же значение коэффициента обслуживаемости для системы при разной безотказности и разных временах простоя, зависящих от поведения пользователя. Рассмотрим, например, в двух ситуациях систему, наработка на отказ компонентов которой равна 200 ч:

1. *Ситуация А.* Пользователь требует, чтобы инженер тщательно исследовал каждое событие. В результате сильно возрастает время исследования, но снижается число событий на один отказ, т. е. возрастает наработка на исследование. Таким образом, наработка на событие 100 ч; среднее время простоя на событие 2,5 ч; коэффициент обслуживаемости 97,6%.

2. *Ситуация Б.* Пользователь не позволяет инженеру исследовать причины отказа в рабочее время и постоянно перезагружает систему, что приводит к большому числу событий на отказ, но к снижению среднего времени простоя. Таким образом, наработка на событие 20 ч; среднее время простоя на событие 0,5 ч; коэффициент обслуживаемости 97,6%.

Изучение полученных результатов показывает, что в среднем коэффициент обслуживаемости большинства вычислительных систем изменяется в пределах от 90 до 99%.

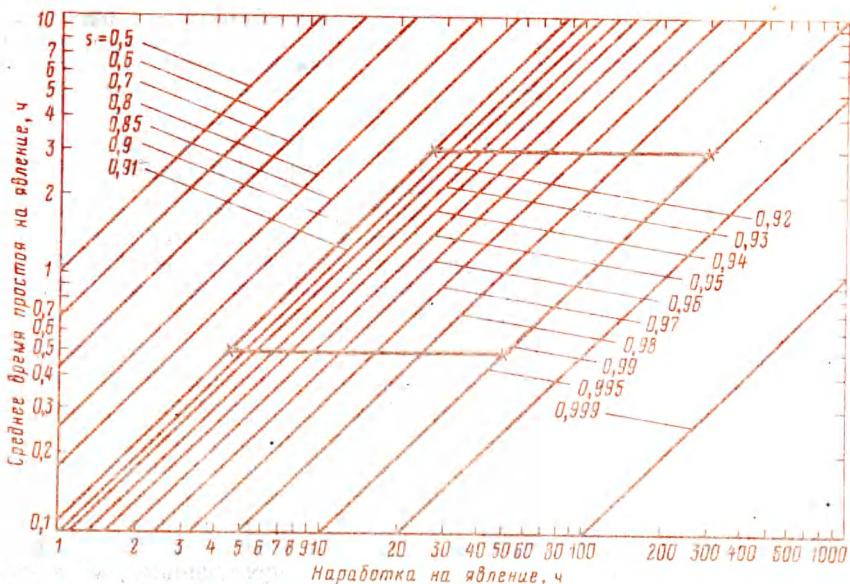


Рис. 8.1. Графики для определения коэффициентов обслуживаемости в зависимости от безотказности и среднего времени простоя. Для установленных систем значения наработки на событие и среднего времени простоя на событие обычно заключены внутри области, ограниченной крестами

Среднее время простоя на событие обычно изменяется в пределах от 0,5 до 3 ч. Следовательно, как следует из рис. 8.1, наработка системы на прерывание колеблется от 4,5 до 3000 ч.

До сих пор рассматривался только усредненный по времени коэффициент обслуживаемости, однако на более коротких промежутках времени в зависимости от их длительности, а также от значений безотказности и времени простоя значения коэффициента обслуживаемости (будем называть его интервальным коэффициентом обслуживаемости) могут значительно отличаться от его среднего значения. Для получения исчерпывающих сведений потребовалось бы рассмотреть бесконечно много разнообразных условий определения интервального коэффициента обслуживаемости, но и без этого все же можно усмотреть некоторые общие закономерности.

Влияние безотказности системы на интервальный коэффициент

На рис. 8.2 приведено семейство кривых, соответствующих различным значениям среднего (по времени) коэффициента обслуживаемости полезного времени в месяц. По кривым можно определить соответствующий интервальный коэффициент обслуживаемости для любого относительного числа (в процентах) месячных периодов. Например, при среднем (для 50% месячных периодов) коэффициенте обслуживаемости, равном 90%, можно ожидать, что в 95% периодов коэффициент обслуживаемости будет не менее 81%, т. е. в 5 мес из 100 значение этого коэффициента

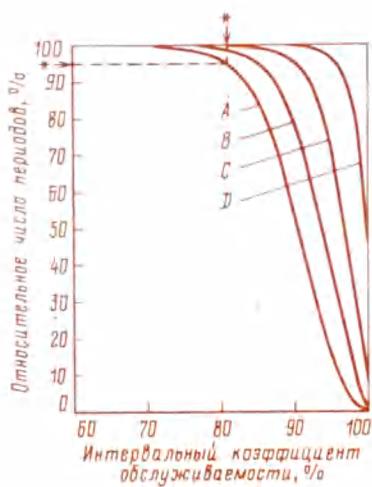


Рис. 8.2. Распределения коэффициента обслуживаемости при заданном среднем времени простоя на явление (3,5 ч), заданном полезном времени (250 ч) и различной безотказности:

* – в 95% периодов (длительностью 250 ч) интервальный коэффициент обслуживаемости не ниже 81%. Кривым A, B, C, D соответствуют следующие значения среднего коэффициента обслуживаемости: 90, 93, 96, 99% и следующие значения наработки на явление: 31,5; 46,5; 84; 347 ч соответственно

циента будет ниже 81%. Кривые на рис. 8.2 построены при следующих предположениях (которые могут быть как справедливы, так и нет):

1. Отказы основного оборудования случайны и подчиняются распределению Пуассона (см. гл. 1).

2. Хотя отказы могут приводить к нескольким событиям или исследованием, время простоя в основном отнесено к одному из периодов, а его остаток случайным образом распределен по другим периодам.

3. В наличии имеется некоторый запас резервного периферийного оборудования, так что время простоя всей системы на отказ сокращается.

4. Пачки событий, связанных с программным обеспечением, распределены по периодам случайным образом.

5. Среднее время простоя на явление равно 3,5 ч, причем лишь 8% явлений приводят к простою, превышающему 8 ч.

Распределения были проверены по данным практического измерения коэффициентов обслуживаемости, и было обнаружено, что они являются характерными для систем со средними показателями безотказности и ремонтопригодности, так что необходимость дальнейшего анализа отпадает.

На рис. 8.2 отражена зависимость интервального коэффициента обслуживаемости от времени безотказной работы при фиксированном распределении времени простоя. При среднем времени между случайными явлениями, равном 31,5 ч, вероятность достижения 100%-ного интервального коэффициента обслуживаемости очень мала, однако при увеличении указанного времени до 347 ч 100%-ный интервальный коэффициент обслуживания достигается в 48% месячных периодов. Интересно заметить, что при среднем коэффициенте обслуживаемости, равном 99%, интервальный коэффициент может снизиться до 90%. Иначе говоря, коэффициент, обратный интервальному коэффициенту обслуживаемости, может быть в 10 раз меньше его среднего значения.

Зависимость интервального коэффициента от периода времени

На рис. 8.3, построенном при указанных выше предположениях, иллюстрируется зависимость интервального коэффициента обслуживаемости от периода при фиксированном среднем коэффициенте обслуживаемости. Рассматриваемыми периодами являются 60-часовые недели, 250-часовые месяцы и 1000-часовые 4-месячные периоды. Эти распределения нельзя использовать для оценки коэффициента обслуживаемости так, как это делалось в предыдущем параграфе (хотя в некоторых случаях такое оценивание допустимо), поскольку различные значения времени простоя или безотказной работы можно получать путем разного числа включений или выключений системы или разных режимов работы. Если рассматривать недельные периоды, то можно заметить, что иногда достичим 100%-ный интервальный коэффициент обслуживаемости, однако в противоположность этому существует некоторое число периодов, когда коэффициент очень низок. Первое свойство имеет место в силу того, что за 60 ч функционирования ожидается мало отказов, а второе свойство является следствием наличия длительных отказов, например один отказ, приводящий к простою продолжительностью 15 ч, повышает коэффициент, обратный интервальному коэффициенту обслуживаемости, до 25%. При больших периодах (1000 ч) отклонения интервального коэффициента от среднего значения не слишком велики.

Зависимость интервального коэффициента от времени простоя

На рис. 8.4 иллюстрируется влияние продолжительности простоя на интервальный коэффициент обслуживаемости при фиксированном полезном времени и постоянной безотказности. Нетрудно заметить, что отклонения значений интервального коэффициента обслуживаемости от среднего увеличиваются с ростом времени простоя. Также можно видеть, что более высокому среднему времени простоя соответствует примерно такое же распределение, как при более низком среднем времени простоя и меньшем времени безотказной работы на более коротком периоде: кривая В на рис. 8.4 заняла бы на рис. 8.3 промежуточное положение между кривыми для 60 и 250 ч полезного времени и соответствовала бы там примерно 150-часовому периоду полезного времени.

Наихудшие случаи

По графикам, изображенным на рис. 8.5 и 8.6, можно оценить ситуации с самыми низкими интервальными коэффициентами обслуживаемости и разных (удовлетворительном, плохом и хорошем) распределениях времени простоя.

90%-ный доверительный интервал. Семейство кривых, приведенных на рис. 8.5, соответствует 90%-ному доверительному интервалу, т. е. по заданному среднему коэффициенту обслуживаемости можно определить интервальный коэффициент обслуживаемости для 90% рассматриваемых промежутков времени. Например, для системы со средним коэффициентом обслуживаемости, равным 96%, работающей в течение 60 ч в неделю или 250 ч в месяц:

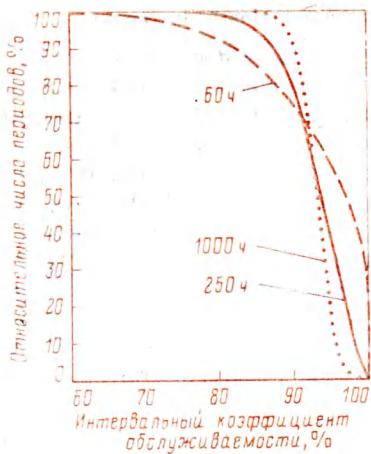


Рис. 8.3. Распределения коэффициента обслуживаемости в зависимости от длины периода (при одинаковых распределениях времени простоя и одинаковой безотказности).

Средний коэффициент обслуживаемости 93%, наработка на явление 46,5 ч, среднее время простоя на явление 3,5 ч

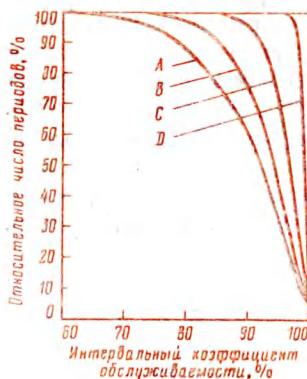


Рис. 8.4. Распределения коэффициента обслуживаемости при заданной безотказности (наработка на явление 84 ч), заданном полезном времени (250 ч) и различных распределениях времени простоя:

кривым A, B, C, D соответствуют следующие значения среднего коэффициента обслуживаемости: 90; 93; 96 и 99% и следующие значения среднего времени простоя на явление: 9,3; 6,3; 3,5 и 0,85 соответственно

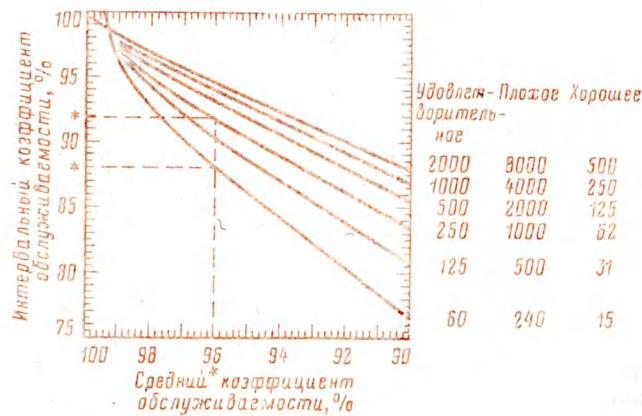


Рис. 8.5. Коэффициенты обслуживаемости при 90%-ном доверительном интервале:

* – при среднем коэффициенте обслуживаемости, равном 96%, в 90 из 100 60-часовых периодов интервальный коэффициент обслуживаемости не ниже 88%. Справа от рисунка для каждой кривой указаны значения полезного времени при различных распределениях времени простоя

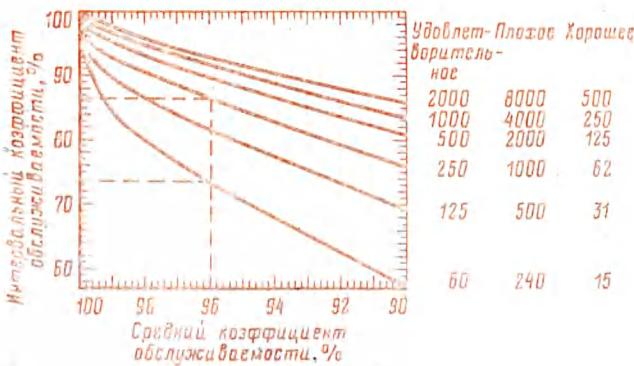


Рис. 8.6. Коэффициенты обслуживаемости при 99%-ном доверительном интервале. Справа от рисунка для каждой кривой указаны значения полезного времени при различных распределениях времени простоя

- 1) в 90 нед из 100 интервальный коэффициент обслуживаемости достигнет значения, не меньшего 88% (на 1 нед из каждого 10 коэффициент упадет ниже 88%);
- 2) в 90 мес из 100 этот коэффициент будет не менее 91,6% (в 1 мес из 10 упадет ниже 91,6%).

Все кривые на рис. 8.5, за исключением кривых, соответствующих 60 и 2000 ч полезного времени, построены только до значения среднего коэффициента обслуживаемости, равного 99%, поскольку они пересекаются за этой точкой. Этот факт действительно имеет место, потому что на менее продолжительных периодах времени при высоком среднем коэффициенте обслуживаемости время простоя может быть равно нулю более чем на 90% всех периодов. В приведенном выше примере рассматривались периоды времени при удовлетворительном распределении времени простоя со средним его значением, как и ранее, равным 3,5 ч. Кривые, изображенные на рис. 8.5, можно также использовать и для более продолжительных периодов времени, когда распределение времени простоя плохое, или для более коротких периодов — при малых временах простоя (при хорошем распределении времени простоя).

Неудовлетворительное распределение времени простоя свойственно системам без резервного периферийного оборудования при обслуживании по вызову с длительным временем ожидания, со значительным числом отказов, для исправления которых требуемый резерв отсутствует, и со слабой ремонтопригодностью, приводящей к необходимости проведения нескольких исследований на отказ. В этом случае среднее время простоя достигает 14 ч и представляет собой среднее время простоя на отказ, если все отказы проявляются в течение рассматриваемого периода.

Хорошее распределение времени простоя (среднее время простоя на случайное явление менее 1 ч) присуще системам с дублированием, в которых мало длительных периодов простоя, вызванных неполнотой резерва, трудностями с обслуживанием или пониженной ремонтопригодностью. Более низкие значения средних коэффициентов обслуживаемости вызываются возникновением частых системных отказов, обусловленных от-

казами программного обеспечения, однако если последние носят случайный характер, приведенные кривые все же применимы. На практике доверительные интервалы, приведенные для хорошего распределения времени простоя, могут быть получены также для систем с большим числом событий на отказ, если события в основном вызваны случайными сбоями с малым временем исследований, хотя в этом случае наблюдаемая более низкая безотказность ведет к снижению среднего коэффициента обслуживаемости системы.

99%-ный доверительный интервал. Семейство кривых, приведенных на рис. 8.6, соответствует 99%-ному доверительному интервалу, причем остальные параметры выбраны такими же, как и для кривых на рис. 8.5. Согласно рис. 8.6, если средний коэффициент обслуживаемости системы равен 96%, то можно ожидать, что:

1) при удовлетворительном распределении времени простоя в 1 нед из 100 интервальный коэффициент обслуживаемости упадет ниже 73,5% или при плохом распределении времени простоя будет снижаться до того же уровня в 1 мес из 100;

2) при удовлетворительном распределении времени простоя в 1 мес из 100 интервальный коэффициент обслуживаемости не превысит 86,3% или при хорошем распределении времени простоя будет таким же в 1 нед из 100.

Хотя коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, уже упоминался, следует снова подчеркнуть, что он и здесь дает гораздо более ярко выраженную оценку возмущений, вызванных отказами, чем коэффициент обслуживаемости: например, в первом из разобранных выше случаев интервальный обратный коэффициент равен 26,5%, что более чем в 6 раз хуже его среднего значения.

Глава 9

РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Высокую безотказность компонентов невозможно заменить чем-либо, однако системе можно придать различные свойства или построить некоторые процедуры, в результате чего она будет продолжать функционирование даже при наличии в ней неисправностей, а времена простоя сокращаются; и все же безотказность и другие свойства системы необходимо рассматривать в совокупности. Вследствие ошибок проектирования все системы первоначально являются ненадежными, поэтому чем больше возможностей для обнаружения неисправностей заложено в системе, тем легче обнаружить ошибки проектирования, ввести в систему соответствующие изменения и добиться высокой надежности. Для определения этих свойств вводятся следующие термины:

1) *ремонтопригодность* – простота, с которой может быть выполнено техническое обслуживание системы;

- 2) *отказоустойчивость* – способность продолжать успешное функционирование даже при наличии неисправностей;
- 3) *восстанавливаемость* – способность к восстановлению и продолжению успешного функционирования после возникновения отказа;
- 4) *диагностируемость* – способность к обнаружению и поиску отказов;
- 5) *избыточность* – наличие резервного оборудования, обеспечивающего возможность реконфигурации, или мажорирование устройств, выполняющих одновременно одни и те же функции, для продолжения правильного функционирования системы при наличии неисправностей в первоначально заданном числе устройств;
- 6) *реконфигурация* – изменение структуры системы;
- 7) *целостность* – способность системы сохранять информационное содержание и однозначность интерпретации данных.

Многочисленные недоразумения, вызванные употреблением перечисленных терминов в различных смыслах, и разнообразные заявления поставщиков вычислительных систем о предоставляемых пользователям возможностях (с использованием этих терминов) заставляют нас подробно рассмотреть эти возможности и оценить, насколько они полезны.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Возможность диагностирования неисправностей с точностью до неисправного компонента или смесного модуля представляет собой одно из основных заявлений некоторых поставщиков и является предметом изучения многочисленных технических статей по проектированию вычислительных машин и испытательной аппаратуры. Идея диагностирования дискретного электронного оборудования обычно основана на предположении о том, что неисправный элемент постоянно находится либо в состоянии 0, либо в состоянии 1, т. е. неисправность является устойчивой. К сожалению, при некоторых технологиях производства устойчивость неисправности состоит в том, что элемент может установиться в состояние между 0 и 1 или произвольно переходить из одного состояния в другое. Кроме того, как отмечалось в предыдущих главах, большинство событий, отмечаемых пользователем, является результатом перемежающихся или неустойчивых отказов, проявляющихся на коротких отрезках времени, в силу чего попытки диагностирования неисправного компонента осуществляются не всегда для того, чтобы минимизировать время простоя системы. Иногда диагностируемость ограничивается возможностью выделения части аппаратуры, содержащей неисправность, даже при перемежающихся и неустойчивых отказах или выяснения, вызвано ли событие отказом программного обеспечения или неисправностью аппаратурой. Это может быть полезно для придания уверенности в том, что исследуется неисправная часть вычислительной системы.

На практике диагностирование устойчивых отказов может выполняться встроенными средствами самотестирования, либо с помощью совместного использования испытательных программ и аппаратурных средств диагностирования, позволяющих указывать место неисправности с точностью до контакта, либо с помощью специально построенных тестов с учетом

функционального разбиения системы на модули. Поскольку устойчивые отказы обусловливают, по-видимому, менее 10% времени простоя системы, следует тщательно исследовать вопрос о введении значительного объема дополнительной аппаратуры, предназначеннной исключительно для диагностических целей, так как не исключено, что больше времени будет потрачено на выявление сбоев в этой аппаратуре, чем сокращено вследствие ее применения.

Диагностирование перемежающихся неисправностей ведется на основе приобретенного опыта и зафиксированных данных о ситуациях, возникающих при наличии отдельных неисправностей, иногда на основе экспериментальных данных, собранных за время функционирования системы и анализируемых специальной программой, или, если такая возможность имеется, путем воспроизведения условий, при которых проявляется неисправность, с заменой отдельных блоков методом проб и ошибок. Сбор и регистрация данных о работе системы могут осуществляться вручную инженером или автоматически заноситься в журнал ошибок с помощью дополнительного оборудования, предназначенного для контроля и индикации ошибок.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ

Вычислительные системы обеспечиваются разнообразными испытательными программами, причем усилия на их создание, затрачиваемые поставщиками вычислительных систем, сильно различаются в зависимости от областей применения систем. Испытательные программы можно в общих чертах разделить на следующие:

- 1) диагностические;
- 2) функциональные;
- 3) тренировочные испытательные;
- 4) проверки взаимодействия;
- 5) реализуемые в процессе рабочего функционирования системы;
- 6) проверки временных характеристик;
- 7) проверки совместимости.

Диагностические испытательные программы

Ряд поставщиков, особенно тех, кто работает для военных целей и в области передачи сообщений, концентрирует свои усилия на обеспечении систем диагностическими программами, позволяющими установить место константной неисправности по меньшей мере с точностью до неисправного модуля. Диагностирование обычно базируется на применении встроенных средств, позволяющих вести непосредственную запись в определенные регистры, управление таймером для выполнения частичных инструкций или функций, считывание содержимого регистров, триггеров ошибок и кода состояния системы; зачастую эти возможности сочетаются с наличием отдельного диагностического процессора или специально разработанной управляющей аппаратуры. Для разработки диагностических программ требуется много времени и усилий, которые могут также включать машинное моделирование на другом процессоре или физическое

введение неисправностей в разрабатываемую аппаратуру. При машинном моделировании каждый логический элемент по очереди полагается неисправным сначала с неисправностью "константа 0", а затем "константа 1" и строится последовательность тестовых воздействий, обнаруживающих неисправный модуль (иногда неисправный компонент), при этом вероятность получить одинаковые признаки проявления неисправностей разных логических элементов в результате приложения одного тестового воздействия очень мала. При физическом внесении неисправностей входы компонентов должны быть либо оборваны, либо закорочены; для упрощения этой процедуры могут быть изготовлены специальные модули.

После окончания разработки диагностические программы обычно позволяют примерно для 90% устойчивых неисправностей указать один неисправный модуль, а для остальных — два-три модуля, в которых подозревается наличие неисправности.

Из-за высокой полноты обнаружения и большой глубины поиска неисправностей эти программы выполняются гораздо дольше, чем функциональные испытательные программы, так что, не будучи очень полезным средством диагностирования перемежающихся отказов, они могут оказаться слишком медленными для проведения быстрой и надежной проверки факта отсутствия устойчивых неисправностей.

Функциональные испытательные программы

Наиболее часто поставляемыми испытательными программами являются функциональные испытательные программы, каждая из которых предназначена для проверки отдельного устройства. Эти программы первоначально разрабатываются в период проектирования аппаратуры в качестве проверяющих тестов для проверки выполнения каждой функции отдельного устройства, а затем независимо от глубины дальнейшей разработки устройств продолжают использоваться при проверке аппаратуры в условиях ее производства, когда возможны кратные устойчивые неисправности.

Самая примитивная функциональная испытательная программа состоит из следующей последовательности инструкций:

ВЫПОЛНИТЬ ФУНКЦИЮ

ЕСЛИ РЕЗУЛЬТАТ ПРАВИЛЕН, ТО ПЕРЕЙТИ К СЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ

СТОП

СЛЕДУЮЩАЯ ФУНКЦИЯ

Если функция выполняется неверно, то выполнение программы прерывается. Прерывание длится до тех пор, пока инженер не установит, какая функция проверяется и каковы результаты (по содержимому счетчика адреса программных инструкций и других регистров), а затем не определит по схеме устройства область, содержащую неисправность. Даже самые примитивные программы выполняются в логической последовательности, начиная с простейших функций, без использования частей аппаратуры, которые не были проверены при проверке других частей. Однако инженер обычно попадает в тупик, если программа не загружается и не начинает выполнятся.

На некоторых мини-ЭВМ имеются лишь указанные примитивные испытательные программы, однако большинство систем обладает программами, печатающими сообщения о неверно выполняемых функциях и результатах выполнения проверок. В обоих случаях при самом низком уровне программ выполняются только одна или две простейшие проверки каждой функции (например, при нулевом и единичном воздействиях), и, таким образом, они реально используются только для проверки устойчивых неисправностей, хотя, видимо, существует возможность зацикливания частей программы, что может помочь при воспроизведении условий проявления довольно сложных перемежающихся неисправностей.

Эти простые программы отличаются малым числом машинных команд и небольшим временем выполнения (например, при проверке процессора требуется несколько миллисекунд). Однако они находят применение (хотя при более развитом инженерном программном обеспечении ими часто пренебрегают) именно из-за их свойства быстрой проверки отсутствия константных неисправностей. При наличии неисправностей такого рода, обнаруживаемых в мини-ЭВМ с очень малым числом модулей, неисправность может быть устранена после замены трех-четырех модулей и повторного исполнения испытательной программы, причем вся эта процедура занимает столько же времени, сколько требуется для выполнения полной диагностической программы на исправном оборудовании.

Более сложные функциональные испытательные программы выполняются несколько дольше (например, для проверки процессора необходимо несколько секунд), однако при этом производится несколько проверок каждой функции и может быть предпринята попытка частичного диагностирования с указанием области, содержащей неисправность. Такие программы позволяют воспроизводить основную часть ситуаций проявления перемежающихся неисправностей, особенно если зациклить их для непрерывного выполнения; кроме того, их можно использовать для устранения устойчивых неисправностей путем замены отдельных модулей.

Тренировочные испытательные программы

Многочисленные неисправности, приводящие к перемежающимся событиям, проявляются на определенных наборах данных или при выполнении определенных последовательностей функций, и единственным способом воспроизвести их снова является повторение именно тех же наборов данных или последовательностей функций. Некоторые из этих неисправностей могут представляться пользователю как устойчивые при его попытках повторять одну и ту же программу, однако функциональные испытательные программы не воспроизводят тех условий, при которых проявляются такие неисправности. Ошибки проектирования также могут быть отнесены к этой категории, причем давно известно, что некоторая редкая последовательность, на которой проявляется ошибка, может встретиться спустя годы после введения системы в эксплуатацию. Трудности, связанные с поиском таких последовательностей, становятся очевидными, если определить время, необходимое для исследования всех возможных комбинаций наборов данных, появляющихся в результате обработки

всех возможных последовательностей и комбинаций команд (это время быстро становится бесконечным), однако, к счастью, некоторые последовательности оказываются более эффективными, чем другие. Примером тренировочной испытательной программы, поставляемой большинством производителей вычислительных машин, является тест для запоминающих устройств, который включает следующие подпрограммы (первая и вторая представляют собой функциональные тесты) :

- 1) тест адресации – запись собственного адреса в каждую ячейку с последующим его считыванием и проверкой;
- 2) тест "все единицы (нули)" – запись в каждую ячейку набора, состоящего только из единиц, и его считывание, после чего те же операции повторяются для нулевого набора;
- 3) шахматный тест – запись и считывание комбинаций 101010 . . . в четные строки и 010101 . . . – в нечетные, а затем та же процедура с инверсными комбинациями;
- 4) для каждой ячейки по очереди производятся запись и считывание комбинаций, состоящих из одного полного слова единиц и нулевого остатка, и повторение той же процедуры с инверсными комбинациями;
- 5) непрерывная запись нуля в ячейку, а затем запись и считывание единицы; процедура повторяется для всех ячеек;
- 6) проверка ячеек в других "трудных" режимах (специфических для конкретной конструкции памяти) с прямыми и инверсными комбинациями;
- 7) запись и считывание случайных наборов при случайной адресации;
- 8) проверка схем контроля четности и схем исправления ошибок (при этом требуется специальная аппаратура для внесения ошибок).

Один проход теста для запоминающего устройства может длиться как менее 1 мин, так и более 1 ч в зависимости от типов включенных в тест подпрограмм и емкости памяти.

Тренировочные программы для процессоров могут быть составлены из псевдослучайных последовательностей команд и операндов и длиться до нескольких часов без повторения последовательностей. Другие тренировочные программы могут выполнять ряд функций с суммированием получаемых результатов и единственной их проверкой после нескольких тысяч (или миллионов) проходов программы. Более усовершенствованные программы могут обладать средствами введения в них последовательностей команд из программ пользователя или из программного обеспечения системы, если есть подозрение, что на них проявляется отказ или сбой.

Тренировочные испытательные программы создаются для большинства периферийных устройств. Проверки НМЛ включают процедуры записи и считывания фиксированных или случайных наборов данных по всей ленте, записи с последующей перемоткой и затем считывания информации вдоль ленты, а также записи и считывания участков переменной длины.

Программы для НМД могут содержать процедуры записи и считывания различных наборов данных, в том числе и случайных, по всей поверхности диска, записи и случайного считывания для проверки правильности

переключения магнитных головок, а также записи и считывания записей различной длины.

Подобные программы обычно поставляются также для всех медиенных периферийных устройств, чтобы проверить ввод и вывод всех допустимых символов по всем форматным позициям и испытать механизмы, логические схемы и источники питания при полной нагрузке.

Тренировочные испытательные программы, особенно те из них, которые постоянно совершенствовались для проверки оборудования во вновь обнаруженных тяжелых режимах работы, могут довольно успешно применяться для воспроизведения сложных перемежающихся неисправностей, однако основным их недостатком является значительное время выполнения. Это время часто можно сократить, если в наличии имеются средства изменения характеристик оборудования или окружающей среды, например средства задания предельных режимов напряжения питания, частоты синхронизации, температурных колебаний или вибраций. Для одного из очень сложных и больших процессоров совместное использование тренировочных испытательных программ и средств задания граничных режимов работы (при конструктивном и функциональном модульном построении процессора и полном комплекте запасного оборудования) обеспечило возможность воспроизведения и обнаружения за относительно короткое время большинства перемежающихся неисправностей (причем основная их часть фиксировалась в периоды планового обслуживания) и ряда неисправностей непосредственно перед началом работы пользователей, на качество которой они могли бы повлиять, 60% неисправных модулей заменялись во время планового обслуживания, следовательно, повысилась безотказность, фиксируемая пользователем, и система оказалась одной из тех немногих, где возможно настоящее профилактическое обслуживание процессора. Этот факт отражен в табл. 9.1, где сравниваются характеристики подобной системы и системы, обладающей низкой ремонтопригодностью (этой системе соответствует табл. 1.4): для первой из

Таблица 9.1. Характеристики систем с высокой и низкой ремонтопригодностью

Характеристики системы	Система с высокой ремонтопригодностью	Система с низкой ремонтопригодностью
Число отказов	50	50
Число исследований, среднее и общее время простоя в периоды функционирования системы	$26 \cdot 2,16 = 56,16$ ч	$150 \cdot 2,5 = 375$ ч
Число исследований в периоды планового обслуживания	40	Мало по сравнению с числом исследований, проводимых в периоды функционирования системы
Число системных отказов, среднее и общее время восстановления	$134 \cdot 0,16 = 21,44$ ч	$350 \cdot 0,5 = 175$ ч
Общее время простоя	77,6 ч	550 ч
Среднее время простоя на события	0,58 ч	1,57 ч
Число событий на отказ	2,68	7
Среднее время простоя на отказ	1,55 ч	11,0 ч

них число исследований на отказ (в периоды функционирования) примерно равно 0,5, а время простоя на отказ – 1,55 ч. Единственный недостаток первой системы заключается в необходимости проведения регулярного планового обслуживания; поэтому если система предназначена для непрерывного функционирования, то ее время простоя должно увеличиться за счет проведения 40 дополнительных исследований.

Программы проверки взаимодействия

Программы проверки взаимодействия являются иной формой тренировочных испытательных программ и разрабатываются для воспроизведения отказов, вызванных сменой программ и операций ввода-вывода. Эти программы допускают также одновременную проверку периферийного оборудования и процессора для целей планового обслуживания. Программы проверки взаимодействия требуют разработки специальной программы, управляющей выполнением серии функциональных или тренировочных испытательных программ. Одни простейшие программы проверки взаимодействия могут позволять проверку в мультипрограммном режиме только процессора, запоминающего устройства и каналов, другие могут содержать также тесты периферийного оборудования, но при наличии довольно примитивной программы-планировщика. Более совершенные программы, управляющие прохождением теста, позволяют одновременно выполнять несколько копий одной испытательной программы (например, по одной копии для проверки каждого периферийного устройства одного и того же типа), обладая функциями планирования, управления приоритетами и программами и т. д., и работают подобно обычной операционной системе. При воспроизведении 'перемежающихся неисправностей и проверке качества ремонта программы проверки взаимодействия также отнимают достаточно много времени: обычно потери времени изотовителей, регулярно пользующихся такого рода программами, составляют дополнительные полчаса на одно исследование. Поэтому, если число исследований на отказ сокращается незначительно, выполнение проверок взаимодействия может привести к увеличению времени простоя, однако в некоторых мини-системах, где принимается во внимание время ожидания и число визитов инженера для исследований, такие программы проверки взаимодействия должны сократить время простоя.

Программы, реализуемые в процессе рабочего функционирования системы

Программы, реализуемые в процессе рабочего функционирования системы, являются программами, выполняемыми под управлением обычного программного обеспечения системы одновременно с программами пользователей. Они могут быть предназначены для следующих целей:

- 1) проверки устройств системы без увеличения времени ее простоя;
- 2) проверки свойства целостности системы;
- 3) в качестве системной программы проверки взаимодействия.

Чаще всего такие испытательные программы используются для проверок периферийного оборудования и обычно принадлежат к классу либо

функциональных, либо тренировочных испытательных программ. Программы, хранящиеся на диске или магнитной ленте, инициируются либо с главного пульта управления, либо с инженерного пульта (если он имеется) и требуют наличия средств подавления системных механизмов планирования для обеспечения выбора определенных устройств. Программы для проверки периферийного оборудования могут обеспечивать выполнение инженерных исследований в первую смену работы системы без увеличения времени ее простоя и специально предназначены для систем, от которых требуется высокая степень готовности. Менее распространеными являются рассматриваемые программы для проверки определенных областей основной памяти, каналов ввода-вывода и таких периферийных устройств, как магнитные барабаны, используемые для организации обменов и обычно недоступные программам пользователя, поскольку при этом требуются более значительные изменения в программном обеспечении системы. Эти программы, если они выполняются относительно редко, могут не оказывать заметного влияния на пропускную способность большой системы, хотя в малых системах потери времени центрального процессора на генерацию и сравнение данных, используемых для проверок, могут значительно снизить пропускную способность. Например, в малой системе на генерацию данных, их запись, считывание и проверку в испытательной программе для накопителя на магнитной ленте могло бы понадобиться 10 мин времени центрального процессора.

Некоторые системы, особенно применяемые для военных целей и в областях, связанных с передачей сообщений, снабжаются испытательными программами рассматриваемого класса для проверки свойства целостности системы. В простейшем виде загрузка в систему и выполнение таких программ планируются непрерывно и автоматически, причем их выполнение производится всякий раз, когда процессор находится в холостом режиме. Главное достоинство этого класса испытательных программ заключается в гарантии того, что система не будет функционировать в течение длительного периода при наличии в ней устойчивых неисправностей, которые могут привести к искажению значительной части данных. Сейчас неизвестны случаи, когда вычислительная машина, предназначенная для научных целей, функционировала бы на протяжении нескольких дней с необнаруженной устойчивой неисправностью в схемах арифметического устройства с плавающей запятой, а результаты, получаемые при этом для большинства программ, оказались бы искаженными незначительно. Потребность в использовании испытательных программ для проверки свойства целостности отпадает, если все необходимые функциональные узлы системы снабдить надлежащим встроенным контролем. Однако для процессоров, не имеющих встроенных средств слежения за правильностью их функционирования, такие испытательные программы могут значительно уменьшить время работы при наличии необнаруженной неисправности. И все же в системах последнего типа перемежающиеся неисправности и сбои могут привести к выдаче неверных результатов, поскольку возможно, что с помощью испытательных программ, отрабатываемых в течение коротких промежутков времени, не будут воспроизведены условия проявления и обнаружения

указанных неисправностей. Простейшие испытательные программы могут вызвать значительное снижение пропускной способности системы при работе пользователя (например, на 10%) из-за времени, необходимого для внешнего обмена, всякий раз, когда в это время задача пользователя с наивысшим приоритетом требует работы процессора. Более совершенные испытательные программы со встроенным планировщиком создают очередь из своих программ, предназначенных для выполнения через определенные интервалы времени (например, через каждые 10 мин) с длительностью выполнения в течение определенного времени (например, в течение 2 с) или заданное число раз, причем значения этих интервалов и длительностей выполнения изменяются в соответствии с требованиями конкретного пользователя или в связи с необходимостью более частого повторения программ, если ожидаются отказы оборудования.

Комбинация испытательных программ рассматриваемого класса для процессора и периферийных устройств может составить хорошую программу проверки взаимодействия отдельных частей системы, особенно для поиска отказов, вызванных взаимодействием оборудования и управляющего программного обеспечения. Кроме того, они полезны при приемных испытаниях и проверке готовности для определения жизнеспособности новой системы. Однако не рекомендуется регулярно выполнять такие испытательные программы проверки взаимодействия одновременно с работой пользователей, так как, по-видимому, время простоя при этом скорее увеличится вследствие затрат на восстановление системы после отказов, вызванных неправильным взаимодействием, чем сократится за счет воспроизведения и устранения перемежающихся неисправностей в более короткие сроки.

Программы проверки временных характеристик

Для измерения временных характеристик оборудования вычислительных машин иногда поставляются специальные испытательные программы или процедуры, входящие в состав инженерных программ общего назначения. Эти программы используются для измерений:

- 1) времени, необходимого для выполнения центральным процессором отдельных команд или последовательностей команд;
- 2) скорости передачи информации по каналам ввода-вывода;
- 3) скоростей вращения дисков, времени перемещения и переключения магнитных головок и скоростей передачи информации;
- 4) скорости передачи информации в НМЛ, времени запуска и останова, длины промежутков между блоками информации, времени обратной перемотки ленты и т. д.;
- 5) скорости передачи информации в медленных периферийных устройствах и т. д.

Эти программы полезны для первоначальной проверки удовлетворения технических условий на новое оборудование, обнаружения неисправностей, вызванных изменением временных соотношений, проверки корректности регулировок и выяснения соответствия техническим условиям после изменений, внесенных в проект системы во время проектирования.

Программы проверки совместимости

Тесты для устройств ввода с перфокарт и перфоленты всегда предначинаются для считывания результатов работы тестовых программ устройств вывода на перфокарты и перфоленту соответственно. Эти тесты являются не только функциональными, но также обеспечивают проверку совместимости, т. е. проверяют, что отклонения от шаблона, производимые перфоратором, приемлемы для устройства считывания.

Накопители на магнитных лентах и дисках обычно налаживаются с помощью специальных калибровочных лент или дисков, однако иногда вместе с устройствами поставляют специальные испытательные программы для дополнительной проверки того, что информация, записанная на каком-либо из устройств, может быть считана на любом другом устройстве того же типа. Для проверки полной совместимости на одной заданной последовательности наборов данных может потребоваться слишком много времени при значительной конфигурации системы. Например, при наличии 20 взаимозаменяемых НМД в предположении, что первый сеанс считывания производится на том же устройстве, где записывалась информация, необходимо 20 сеансов записи, $20^2 = 400$ сеансов считывания и 380 перестановок пакетов дисков с одного устройства на другое; подобная процедура может длиться несколько часов. Другие программы проверки совместимости записывают информацию на часть поверхности диска или ленты на одном устройстве, затем эта информация считывается на следующем устройстве, дополняется новыми данными, и процесс продолжается до тех пор, пока носитель не будет снова установлен на исходное устройство для считывания данных, записанных на всех других устройствах; такая процедура приводит к более быстрой проверке совместимости. В обоих случаях есть ограничения при попытке добиться воспроизведимости непонятных наборов данных, отражающих нарушения совместимости, которые могут сильно исказить результаты деятельности пользователей.

СРЕДСТВА ТЕСТОВОЙ ПРОВЕРКИ АППАРАТУРЫ

Средства тестовой проверки аппаратуры бывают самых разнообразных типов, начиная от простых автоматических тестеров, испытательных пультов и кончая диагностическими процессорами. С помощью простейших автоматических тестеров выполняются быстрые проверки отдельных частей вычислительной машины на отсутствие в них устойчивых неисправностей в различные периоды: как перед каждым запуском системы, так и всякий раз при выполнении определенной функции. Тестеры, естественно, не слишком часто применяются для воспроизведения и обнаружения перемежающихся неисправностей, однако, используя их, можно значительно снизить время работы с необнаруженной неисправностью, проверяя свойство целостности системы при наличии в ней устойчивых неисправностей. Более совершенными средствами проверки могут быть микропроцессоры для каждого сменного модуля или блока, обладающие возможностями расширения их функций до функций испытательных пультов или диагностических процессоров.

Испытательные пульты

Испытательные пульты предназначаются для проверок периферийного оборудования, запоминающих устройств, каналов и блоков управления и могут быть либо встроенными, либо внешними переносными, причем каждый отдельный пульт пригоден для проверки устройств одного типа. Простейшие пульты генерируют заданные тестовые наборы данных или последовательности функций, не имеют средств контроля и используются в первую очередь для проверки впервые установленного оборудования или в периоды планового обслуживания.

Наиболее сложные испытательные пульты, обеспечивающие диагностирование устойчивых неисправностей, могут генерировать и контролировать различные последовательности функций и тестовых воздействий. При использовании испытательных пультов в тестовом режиме можно добиться воспроизведения некоторых перемежающихся неисправностей, что сокращает время на исследования и минимизирует время простоя оборудования без какого-либо снижения пропускной способности (как это бывает при использовании испытательных программ, реализуемых в процессе рабочего функционирования системы).

Диагностические процессоры

Естественным развитием автоматических тестеров и испытательных пультов являются диагностические процессоры, обладающие в сравнении с первыми более гибкими и многообразными возможностями и предназначенные для следующих целей:

- 1) выполнения быстрой проверки системы перед загрузкой программного обеспечения и при последующей ее загрузке;
 - 2) контроля состояния оборудования и окружающей среды, регистрации и индикации условий возникновения ошибок;
 - 3) интерпретации состояния системы после отказов, назначения процедур восстановления и участия в восстановлении;
 - 4) выполнения функций диагностического процессора как такового, причем с особым успехом в тех случаях, когда испытательные программы невозможно загрузить в основную систему, а также устранения отказов программного обеспечения в процессе рабочего функционирования системы;
 - 5) управления выполнением испытательных программ в процессе рабочего функционирования системы и в псевдотестовом режиме;
 - 6) определения требований к плановому обслуживанию и наиболее вероятных областей, подозреваемых на наличие в них неисправностей, путем анализа данных журнала ошибок;
 - 7) выполнения инженерных команд, операций контроля и вывода на дисплей, обеспечения средствами изменения информации, хранящейся в системе, и т. д.
- Удачно сконструированный диагностический процессор может сократить время исследования и восстановления, особенно в тех случаях когда в нем предусмотрены собственные средства запоминания информации и устройства ввода-вывода, однако обычно его использование экономически оправдано только в больших системах.

ТЕСТЕРЫ ДЛЯ МОДУЛЕЙ

Тестеры, предназначенные для тестовой проверки модулей (печатных плат), эпизодически применяются для профилактики на месте функционирования системы и почти всегда на станциях ремонта модулей и на заводах, где их производят. В основном такие тестеры применяются для поиска устойчивых константных неисправностей и по сложности изменяются от простых функциональных тестеров, с помощью которых инженер вручную находит место неисправности, до полностью программируемых диагностических средств, способных обнаруживать от 80 до 100% неисправных компонентов в зависимости от сложности проверяемых модулей и усилий, затраченных на конструирование тестера.

Поскольку тестеры создаются для обнаружения только устойчивых неисправностей, их эффективность в поиске неисправностей зависит от ремонтопригодности конкретной системы — обычно требуется заменить в среднем от 1,25 до 5 модулей на одну неисправность. Предполагается, что 50% неисправностей являются устойчивыми, а эффективность применения тестера достигает 100%, рассмотрим следующую таблицу для двух систем *A* и *B*, считая, что в каждой из них возникло 100 неисправностей:

	<i>A</i>	<i>B</i>
Общее число заменявшихся модулей	125	500
Число обнаруженных устойчивых неисправностей	50	50
Число необнаруженных перемежающихся неисправностей	50	50
Число заменявшихся заведомо исправных модулей	25	400

В системе *A* неисправности не обнаружены в 60% модулей, а в системе *B* — в 90% модулей, хотя 67 и 11% из них соответственно все-таки неисправны. Различные производители в таких случаях предпринимают следующие действия:

- 1) возврат модулей в аппаратуру в надежде на удачный исход;
- 2) возврат модулей с подробной записью для отдельных модулей отмеченных условий возникновения отказа (это возможно лишь в тех случаях, когда модули имеют порядковые номера); более подробное исследование ведется, когда модуль возвращен в ремонт вторично;
- 3) возврат модулей в аппаратуру с прикрепленными к ним ярлыками, на которых указаны условия возникновения отказа. Отдельные производители осуществляли такие действия, но затем отказались от них, так как инженеры по ремонту стремились возвратить модули на завод для тщательного исследования;
- 4) возврат модулей в аппаратуру с потайной отметкой; такое действие препятствует возникновению проблемы, описанной в п. 3, однако зарегистрированные симптомы отказа в этом случае утрачиваются;
- 5) выполнение более тщательной проверки модулей при испытаниях в обычных и предельных режимах, а также в условиях вибрации либо на тестерах для модулей, либо в работающем процессоре; этот метод в совокупности с осциллографированием выбран в качестве стандартного метода проверки большинства современных систем, причем тестирование и

измерения ведутся в течение нескольких часов, а функционирование в процессоре – в течение нескольких дней;

б) уничтожение модулей. Один из производителей, столкнувшийся с описанной выше ситуацией для системы типа В (90% исправных модулей), посчитал возможным уничтожение всех заменявшихся модулей, однако последние были очень малы и совсем дешевы для производства. При использовании более сложных модулей было отмечено, что инженеры по ремонту оставляют у себя физически испорченные модули, стоимость производства которых превышает 100 фунтов стерлингов, чтобы исключить возвращение в устройства таких модулей, имеющих перемежающиеся отказы. В больших системах, состоящих из еще более дорогих модулей (например, ценой до 1000 фунтов стерлингов), производители стремятся изъять модули из обращения в надежде, что когда-нибудь появятся средства для воспроизведения перемежающихся неисправностей

Как указывалось ранее, возможности тестеров для модулей совсем не безграничны, однако необходимо подчеркнуть, что для поиска устойчивых неисправностей сложных модулей с глубиной до компонента с помощью тестеров требуется несколько минут, в то время как поиск неисправностей вручную занимает не менее 1 ч, за счет чего достигается значительная экономия ресурсов на станциях ремонта модулей или заводах-изготовителях.

МОДУЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Конструктивный модульный принцип

Для обеспечения ремонтопригодности аппаратура должна быть построена на основе конструктивного модульного принципа, т. е. так, чтобы ее части могли быть легко заменимы. Большинство электронных устройств вычислительной машины удовлетворяет конструктивному модульному принципу, причем их компоненты монтируются на сменных платах. Секции ЗУ на магнитных сердечниках часто содержали в своем составе драйверы, блоки считывания и адресации, выполненные в виде легко заменяемых единиц, однако блок сердечников, включающий многочисленные управляющие диоды, стремились создать как единое крупное устройство; в случае, когда стоимость блока сердечников составляла половину всей стоимости вычислительной машины, было отмечено, что инженер затрачивал 8 ч на ремонт устойчивой неисправности блока даже при наличии запасных частей. Из-за высокой стоимости блока и трудностей, связанных с его транспортировкой на ремонтную станцию, инженер пытался оттянуть замену блока до тех пор, пока он абсолютно не убеждался, что неисправность возникла именно в блоке сердечников. Почти все мини-ЭВМ и ряд базовых конфигураций имеют ЗУ на магнитных сердечниках, смонтированные на сменных модулях подобно тому, как это делается при создании процессора.

Более современные полупроводниковые ЗУ собираются исключительно на сменных платах, что повышает их ремонтопригодность по сравнению

с ЗУ на сердечниках в больших системах при условии, естественно, наличия исправного резерва.

Источники питания монтируют в стойке вычислительной машины в виде одного компонента, чтобы блок питания легко отсоединялся. В большинстве систем основной проводной монтаж ведется с задней стороны стоек, что, несмотря на чрезвычайно высокую надежность монтажа, не позволяет заменить его, если, например, обнаружена коррозия проводников. В других системах монтаж выполнен в виде многослойных печатных плат, расположенных на задней стороне стоек и легко отсоединяемых при необходимости замены.

Функциональный модульный принцип

Хотя основная часть электронного оборудования вычислительной системы выполняется в соответствии с конструктивным модульным принципом, это еще не означает, что всегда соблюден функциональный модульный принцип. Первые вычислительные машины в качестве сменных элементов содержали электронные лампы. Их можно было заменять очень быстро, но они составляли малую долю объема конструктивного модуля, и часто для устранения неисправности требовалось не только замена ламп. В ранних транзисторных системах появилась тенденция к использованию стандартных модулей, содержащих ряд стандартных логических элементов, причем функции модулей определялись проводным монтажом, выполненным на обратной стороне платы: в результате требовалось небольшое число различных резервных модулей. Однако вероятность того, что именно замененный модуль являлся неисправным, была достаточно мала. Те же проблемы имели место в системах, построенных на ИМС, при малом разнообразии стандартных модулей или в тех случаях, когда сменными элементами являлись собственно ИМС.

По мере перехода к созданию более быстродействующих вычислительных машин на основе ИМС средней степени интеграции возникла тенденция к производству модулей большого объема, хорошо удовлетворяющих функциональному модульному принципу. Процессоры мини-ЭВМ, а также ЗУ и каналы ввода-вывода, по-видимому, создаются из 3–10 разных типов модулей. В этом случае инженер-ремонтник часто может иметь при себе все типы модулей, что приводит к тому, что среднее время исследований мало, а число исследований на отказ обычно составляет 1,5. Более сложные системы могут содержать свыше 100 разных типов модулей, каждый из которых состоит из 100 ИМС и более. В результате достигается высокая степень реализации функционального модульного принципа, однако хранить полный запас резервных модулей системы, стоимость которого превышает, например, 50 000 фунтов стерлингов, невозможно с экономической точки зрения, и это ведет к чрезмерному возрастанию времени ожидания доставки запасных модулей (ожидания резерва). При укрупнении модулей, хотя времяостоя системы можно сократить, остается проблема воспроизведения и диагностирования отказов в тестовом режиме или на ремонтных станциях. При неудачной организации этих процессов многие резервные модули могут содержать неисправленные перемежающиеся неисправности.

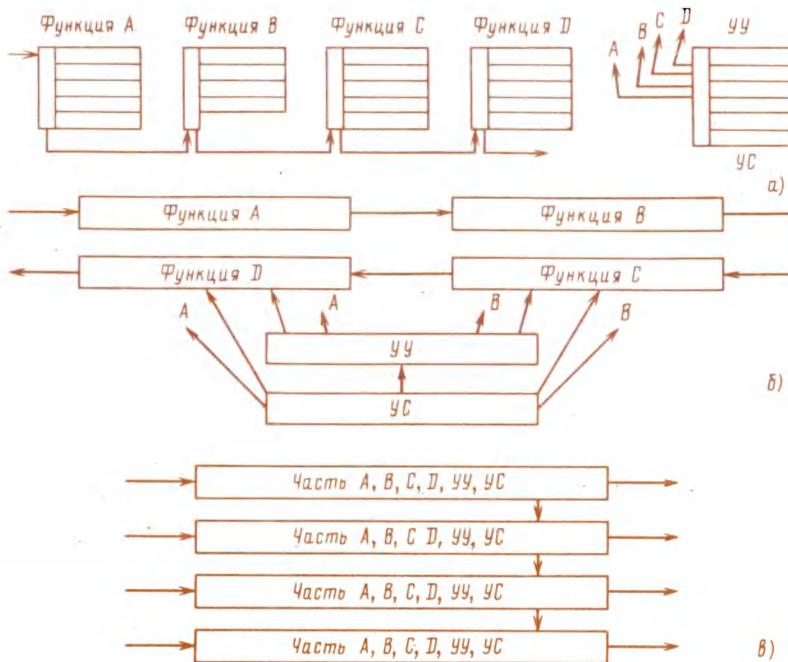


Рис. 9.1. Модульный принцип:

а – способ 1. Большое число стандартных модулей, соединенных проводным монтажом; *б* – способ 2. Стандартная реализация функционального модульного принципа; *в* – способ 3. Оптимизированная реализация функционального модульного принципа; *УУ* – устройство управления; *УС* – устройство синхронизации. Отдельные заменяемые модули представлены прямоугольниками

Даже в тех случаях, когда система состоит из крупных блоков, удовлетворяющих конструктивному и функциональному модульному принципу, и существуют приемлемые процедуры ремонта, могут возникать трудности в обеспечении ремонтопригодности из-за свойств архитектуры системы, например из-за наличия общих средств синхронизации и выделенных отдельно общих средств управления (и неизбежно выделенного отдельно общего источника питания), когда почти любая неисправность может присутствовать либо в функциональных платах, либо в платах устройства синхронизации, либо в платах устройства управления. Лучше всего объяснить оптимальный метод реализации модульного принципа можно на следующем простом примере (рис. 9.1).

Предположим, что необходимо реализовать функции *A*, *B*, *C*, *D*, управление и синхронизацию.

Способ 1. Отдельные блоки могли бы быть построены из небольших стандартных модулей, что привело бы к значительному числу взаимных связей и к низкой ремонтопригодности, однако при низкой стоимости резерва и малом времени ожидания резерва.

Способ 2. Используются платы, построенные в соответствии с функциональным модульным принципом; при этом достигается довольно высокая ремонтопригодность, хотя остаются трудности, обусловленные

наличием общих блоков управления и синхронизации, высокой стоимостью резерва и, возможно, большим временем ожидания резерва.

Способ 3. Для функций, блоков управления и синхронизации используется побитовая реализация (возможно, для синхронизации функциональных блоков требуется базовый несложный генератор тактовых импульсов); при этом достигается весьма удовлетворительная ремонтопригодность, сниженная стоимость резерва и, возможно, низкое время ожидания резерва.

В чистом виде способ 3 может быть неприемлем во многих случаях, хотя до некоторой степени он все-таки реализуем: например, известны мини-ЭВМ с 8-, 16-, 24-, 32-битовой структурой и т. д., построенные на идентичных модулях. По меньшей мере один из производителей более крупных систем в разумных пределах применял описанный оптимизированный функциональный модульный подход, и хотя это привело к значительному числу компонентов, ремонтопригодность фактически была такой же, как и в мини-ЭВМ (менее 1,5 исследования на отказ, 2,5 события на отказ и общее время простоя на отказ менее 4,5 ч). Кроме того, отчасти из-за повышенной ремонтопригодности значительно проще удалось разделить вопросы разработки и создания отдельных частей системы и достичь оптимального уровня безотказности. В гл. 3 указывалось, что процессоры с наибольшим числом компонентов можно создавать с более высокой безотказностью.

Функциональный модульный принцип применялся и на системном уровне при разработке относительно медленного процессора с малой потребляемой мощностью или при создании периферийного контроллера со встроенной микропрограммой, позволяющей использовать его либо как контроллер НМД или НМЛ, либо как контроллер медленных периферийных устройств. В конечном счете этим разработкам также были присущи значительное число компонентов с редким их использованием, высокая безотказность, низкая стоимость резерва, меньшее время обучения процедурам обслуживания, но довольно высокая стоимость производства достаточно редко используемых этих медленных процессоров или контроллеров. Аналогичная ситуация возникает при создании периферийного оборудования, когда одни и те же устройства иногда используются для разных емкостей и скоростей передачи информации.

Интегральные микросхемы с большой степенью интеграции

По мере перехода к производству интегральных микросхем с большой степенью интеграции (БИС) каждая интегральная микросхема может заменять один или более схемных модулей, применявшимся в ранее созданных вычислительных машинах, и обладает потенциально более высокой безотказностью при условии, что качество производства достаточно высоко, а логические функции и электрические свойства конструкции корректны во всех ситуациях.

В большинстве случаев БИС организованы в полном соответствии с функциональным модульным принципом, обеспечивают высокую степень ремонтопригодности систем и в конце концов должны представлять собой микропроцессор на одном кристалле. В достаточно больших систе-

макс кристаллы могут устанавливаться на сменных модулях, обеспечивать еще более высокую степень реализации функционального модульного принципа так, чтобы при возникновении неисправности число исследований на отказ было очень мало. Однако почти все модули процессора будут отличаться друг от друга, и появится значительное число различных БИС. В этом случае маловероятно, чтобы резерв хранился на месте функционирования системы, так что, как и раньше, наиболее ремонтопригодные системы, очевидно, обладают самым большим временем простоя из-за большого времени ожидания резерва. Для сокращения времени простоя на некотором периоде необходимый уровень безотказности должен быть достигнут путем обеспечения как можно более безуказицкой разработки и создания кристалла. Это ведет к очень высокой стоимости разработки, на этапе которой особый акцент делается на автоматизацию проектирования и моделирования. Кроме того, при создании систем процедуры контроля качества должны быть даже более совершенными, чтобы избежать увеличения периода времени "выжигания".

Какие бы методы ни использовались при проектировании, маловероятно, чтобы все кристаллы БИС были логически совершенно корректными. Такое предположение почти эквивалентно ожиданию того, что в программном обеспечении непосредственно после его создания абсолютно отсутствуют ошибки. При разработке можно добиться успеха гораздо быстрее, если ориентироваться на известную архитектуру или известные схемные решения. Если обнаруживаются логические ошибки, трудность состоит не просто в изменении, как прежде, нескольких проводников в модуле, а в изменениях, вносимых в оригиналы фотошаблонов, применяемых для изготовления ИМС, и связанной с этим задержкой исполнения, достигающей иногда нескольких месяцев. Эта задержка может быть уменьшена с помощью конструирования кристалла таким образом, чтобы в большинстве случаев необходимые изменения можно было сделать лишь в верхнем слое микросхемы. Из-за этих трудностей может возникнуть стремление не включать модификации уже известных, хорошо зарекомендовавших себя микросхем во все системы, кроме тех, где, по-видимому, разрешать конкретную задачу придется именно этим путем.

Трудности могут также возникнуть вследствие некорректного составления электрической схемы ИМС, что ведет к дополнительным изменениям конструкции. Хотя моделирование на этапе проектирования призвано сократить изменения такого рода, но, поскольку тесты контроля качества не могут правильно определить задержки и другие параметры отдельных логических элементов, находящихся в глубине БИС, некоторые сочетания допустимых значений параметров и предельных режимов функционирования логических элементов могут приводить к возникновению перемежающихся событий. Если последние проявляются в виде случайных сбоев, пользователь может начать испытывать затруднения от частых прерываний работы системы, хотя и сможет продолжать свою работу до прибытия инженера с исправным запасным модулем.

Одним из путей преодоления трудностей, вызываемых логическими ошибками, является производство относительно малого числа стандартных кристаллов БИС, соединяемых друг с другом для реализации необ-

ходимых функций таким образом, чтобы большую часть изменений логики можно было выполнить вне ИМС. В таком случае основной сменной единицей может оставаться плата, что представляет собой высшее проявление функционального модульного принципа при наличии достаточной степени ремонтопригодности на системном уровне, но с соответствующими проблемами обеспечения резервом. Кроме того, если число стандартных ИМС мало, гораздо проще добиться совершенства процесса производства и тестов проверки качества. Однако при этом могут возникнуть затруднения в связи с недостаточным пониманием поведения отдельных логических элементов, особенно при попытке определения места неисправности на станциях ремонта модулей, поскольку в таком случае собственно микросхемы не очень удовлетворяют функционально-модльному принципу. Описанная ситуация может привести к резкому увеличению стоимости обращения резервных модулей или к тому, что в обращении будут находиться модули с неустойчивыми неисправностями, которые не будут заменены исправными до тех пор, пока пользователь не начнет выражать недовольство.

Для минимизации стоимости резерва основной сменной единицей может быть выбрана ИМС с разъемом. Однако если законченные функции выполняются несколькими кристаллами, ремонтопригодность, определяемая числом исследований на отказ, будет довольно низкой, а из-за необходимости проводить частые замены кристаллов существует опасность потери надежности микроконтактов.

Какой бы метод ни применялся для создания вычислительных машин на БИС, всегда остаются задачи повышения ремонтопригодности, и реальный успех, видимо, больше зависит от качества первичной разработки, процессов производства и проверки. Кроме того, эти приборы обычно должны рассеивать довольно значительную мощность, поэтому, если они будут изготавливаться с использованием той же технологии, что и раньше, когда число событий на отказ возрастает с повышением температуры (см. гл. 4), одной из самых важных задач станет выбор способа охлаждения.

В настоящее время существуют некоторые большие процессоры, высокая надежность БИС которых является показательной: проверка показывает, что инженерное искусство стало значительно выше, чем в ранних системах, при гораздо более обширном контроле качества. Однако применение БИС все-таки содержит опасность снижения ремонтопригодности, о чём говорилось ранее.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

В первых вычислительных машинах обычно имелись возможности изменения напряжения источников питания для того, чтобы изменить характеристики оборудования и в конечном итоге облегчить воспроизведение перемежающихся неисправностей. Управление этими изменениями велось, как правило, с помощью коммутатора, меняющего питание всей машины. Существовавшие средства подобного изменения параметров

в допустимых пределах для запоминающих устройств на магнитных сердечниках в относительно современных системах являлись весьма эффективными для воспроизведения некоторых видов отказов.

Изменения напряжения питания

В большинстве современных вычислительных машин возможность изменения напряжения питания не предусматривается для общей логики, поскольку считается, что влияние изменения напряжения питания одновременно во всех блоках компенсируется при передаче сигналов от одной схемы к другой. Поэтому изменение напряжения питания не может помочь в воспроизведении отказов до тех пор, пока оно не вызовет изменения температурных и временных характеристик или не будут достигнуты пределы, свойственные конкретной конструкции. Существуют, однако, исключительные ситуации, когда изменение напряжения питания приводит к нужному эффекту: в этих случаях напряжение питания изменяется независимо в отдельных сменных модулях, причем допустимые пределы могут устанавливаться динамически под управлением тестовой программы, расширяясь или сужаясь для одного или нескольких модулей в зависимости от необходимости. Наличие допустимых пределов последнего типа является одной из главных причин, в силу которой для лучшей из описанных в табл. 9.1 систем число исследований на отказ меньше 1, причем 60% неисправных модулей заменяется в периоды планового обслуживания.

Изменения временных характеристик

Некоторым типам вычислительных машин присущи частые сбои и перемежающиеся неисправности временного характера, поэтому в современных системах часто предусматривается возможность изменения временных характеристик. Простейшим способом изменения таких характеристик является введение возможности регулировки генератора тактовых импульсов с помощью управляемого переключателя или потенциометра: эти средства весьма полезны, хотя в системах с более высокой ремонтопригодностью предусматривается возможность динамического управления допустимыми пределами тактовой частоты с помощью тестовой программы. В одном из процессоров, обладающих возможностями последнего типа, было отмечено, что именно они позволяют диагностировать некоторые перемежающиеся неисправности с помощью диагностических тестов. Другой способ регулирования временных характеристик заключается в использовании небольших конденсаторов, подключаемых к контрольным точкам исследуемых модулей.

Температурные изменения

Поскольку изменения температуры могут привести к различным последствиям (см. гл. 4), считается, что возможность задания температурных режимов может быть одним из наиболее полезных средств повышения ремонтопригодности. Единственной областью, где предусматриваются изменения температурных режимов, являются вычислительные машины, предназначенные для некоторых военных целей.

Другие виды задания изменений

Изменения напряжения питания или временных характеристик могут осуществляться с помощью применения специальных испытательных блоков или плат, подсоединяемых к оборудованию, в котором предполагается наличие неисправности. Эти же устройства иногда обеспечивают проверку шин ввода-вывода. Особенно полезны они при введении несимметричной синхронизации и пониженного уровня сигналов в системах общих шин, к которым может быть подсоединенено чрезвычайно большое число самых разнообразных устройств, что может приводить к искажениям наборов данных от сбоев.

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИСПРАВЛЕНИЕ ОШИБОК

Проверка четности

Лишь ограниченное число современных процессоров, каналов и контроллеров периферийных устройств имеет проверку четности во всех шинах передачи данных и арифметических устройствах с режимом поточкой обработки и даже в полях памяти для предсказания четности при операциях с плавающей запятой. Основное достоинство проверки четности состоит в обеспечении целостности данных, и это, как указывалось в гл. 6, достигается весьма успешно.

Повторение команд и обращений к устройствам. Если система обладает свойством ремонтопригодности и обеспечена средствами диагностирования, то проверка четности является очень полезным средством поиска устойчивых неисправностей и воспроизведения условий проявления некоторых перемежающихся неисправностей. Вместе с проверкой четности и достоверности при выполнении микрокоманд или операций декодирования команд проверка четности в каналах передачи позволяет повторить команду или обращение к устройству (например, к каналу) при сбоях, обеспечивая таким образом устойчивость системы к отказам, что в свою очередь делает возможным продолжение работы вплоть до наступления периода профилактического обслуживания. В отдельных случаях возможность повторения может привести к значительному сокращению начального времени простоя, однако если неисправность устойчива или является кодочувствительным отказом перемежающейся природы, повторение не дает почти никакой выгоды.

Понять, насколько эффективно повторение команд, можно было бы в результате подробного изучения системного журнала ошибок, в котором отношение числа трудно обнаруживаемых неисправностей к числу неисправностей, легко преодолеваемых за счет повторения, обычно колеблется от 1 до 10; однако наличие устойчивых отказов и чрезвычайно сложных перемежающихся отказов может потребовать сотен повторений, прежде чем система будет остановлена. Повторение команд обладает следующими ограничениями и недостатками:

1. Не все ошибки команд допускают повторение, поскольку шины передачи данных могут составлять только 10% логики процессора.

2. Для того чтобы упростить проверку четности и повторение, в важнейших узлах необходимо поместить многочисленные дополнительные регистры и ввести дополнительные логические схемы для проверки и повторения. Наличие дополнительной логики приводит к риску понизить безотказность, поскольку для выполнения заданных функций устройство содержит больше компонентов, чем необходимо. Диагностирование "простых" отказов при наличии средств проверки четности упрощается, в то время как диагностирование сложных отказов может еще больше усложниться из-за трудностей, вызванных неверной индикацией и перемежающимися неисправностями в схемах проверки.

Средства проверки обеспечивают улучшение диагностируемости, если они применяются в совокупности с корректно использованным функциональным модульным принципом. Однако из-за опасности потери надежности последовательно включенных ремонтопригодных логических схем некоторые проверки лучше выполнять с помощью логических схем, обладающих свойством ремонтопригодности и подключенных параллельно функциональному устройству с тем, чтобы дополнительная логика, как правило, не вызывала отказов системы.

Оперативное запоминающее устройство. Запоминающие устройства на магнитных сердечниках достаточно больших систем обычно содержат схемы проверки четности, предназначенные для обнаружения ошибок в отдельных разрядах и обеспечения целостности данных. Поскольку ЗУ представляют собой большие матрицы с симметрической логикой, то кодовое слово, складывающееся при возникновении ошибки четности, дает возможность определить место неисправности в схемах формирователей, усилителях считывания, неисправных ячейках и т. д. Проверка четности в ЗУ на магнитных сердечниках мини-ЭВМ находит меньшее применение, так как X- и Y-формирователи стремятся сделать общими для всех матриц ЗУ, вследствие чего вероятность ошибки в нескольких разрядах приближается к вероятности ошибки в одном разряде.

Исправление ошибок

Исправление ошибок в оперативном ЗУ (ОЗУ) впервые было применено для запоминающих устройств на магнитных сердечниках, что сделало их устойчивыми к отказам. Это видно из следующего примера для ЗУ емкостью 1 Мбит (128 Кбайт):

Число отказов на 1000 ч	0,3
Относительное число исправимых отказов, %	87
Относительное число неисправимых отказов, %	13
Число неисправимых отказов на 1000 ч	0,04
Число событий на отказ (неисправимый)	5
Число событий на 1000 ч	0,02 (0,5 – при отсутствии исправления ошибок)
Число событий на отказ (все отказы)	0,67

Исправление ошибок применяется в полупроводниковых ЗУ большинства средних и больших систем, продаваемых в настоящее время. Конструкциям этих ЗУ обычно свойственна высокая степень использования

функционального модульного принципа, и, поскольку большинство неисправностей возникает в активных элементах памяти, где они легко обнаружимы, такие ЗУ обладают высокой ремонтопригодностью и низким числом событий на отказ. Ранние ЗУ на МОП-транзисторах обладали низкой безотказностью по сравнению с ЗУ на магнитных сердечниках, однако сейчас этот показатель значительно улучшен. Следующий пример отражает результаты введения исправления ошибок в ранние ЗУ на МОП-транзисторах (емкость памяти 1 Мбит) :

Число отказов на 1000 ч	0,71
Относительное число исправимых отказов, %	93,4
Относительное число неисправимых отказов, %	6,6
Число неисправимых отказов на 1000 ч	0,047
Число событий на отказ (неисправимый)	1,7
Число событий на 1000 ч	0,08
Число событий на отказ (все отказы)	0,11

Приведенный пример свидетельствует о том, что эффективность исправления ошибок в ЗУ на МОП-транзисторах значительно выше, чем в таких же устройствах на магнитных сердечниках, во всяком случае в теоретических работах она часто близка к 99%, причем авторы этих работ стараются не учитывать влияние неисправностей источников питания и отказов общей логики.

Полупроводниковые ЗУ менее устойчивы, чем ЗУ на магнитных сердечниках, и могут быть источником большего числа сбоев. В устройствах, снабженных только проверкой четности, большинство таких неисправностей обнаруживается, однако отдельные виды неисправностей могут вызывать многократные ошибки, которые могут как обнаруживаться, так и не обнаруживаться. При отсутствии проверки четности сбои приводят к увеличению числа событий на отказ и то же число событий, определяемое пользователем, может быть больше, чем в ЗУ на магнитных сердечниках. В большинстве типов полупроводниковых ЗУ небольшой емкости частота возникновения событий может оставаться в допустимых пределах, однако в устройствах большой емкости (например, 1 Мбит) чрезвычайно желательно введение исправления ошибок. Сказанное справедливо и в отношении ЗУ мини-систем, где исправление ошибок применяется не всегда.

Обнаружение и исправление ошибок часто применяется в накопителях на магнитных дисках и при коррекции ошибок не более чем на одной дорожке в НМЛ с фазовым методом кодирования. Это обеспечивает большую устойчивость к отказам или по крайней мере снижает интенсивность событий по сравнению с интенсивностью в ранних устройствах с меньшей емкостью или меньшей скоростью передачи данных.

РЕГИСТРАЦИЯ ОТКАЗОВ

Регистрация истории системы

Как указывалось ранее, наличие схем проверки четности в электронном оборудовании может облегчить поиск устойчивых неисправностей, однако использование их как средства воспроизведения перемежаю-

шихся отказов и сбоев ограничено трудоемкостью необходимого анализа (в отдельных случаях анализ может выполняться с помощью специальной программы).

Регистрация истории системы, собранная за несколько лет для одной из довольно просто ремонтируемых систем, а в настоящее время проводимая и в других системах, представляет собой запись последних 30 операций, выполненных до появления отказа, в том числе запись выполненных функций и использованных данных. В случае обнаружения отказа эта запись может быть выведена в системный журнал ошибок. Затем такая последовательность вводится в тестовые программы для воспроизведения последовательности выполнявшихся функций или наборов данных, на которых был зарегистрирован отказ. Регистрация истории, ведущаяся параллельно нормальному функционированию, не обязательно снижает надежность работы системы и может быть использована для повышения эффективности средств повторения или идентификации системных отказов, вызванных отказами программного обеспечения.

Журнал ошибок

Почти все современные системы, в том числе и мини-системы, имеют средства ведения журнала ошибок, которые при обнаружении неисправности оборудования могут вывести на диск для дальнейшего анализа содержимое ячеек памяти, информацию о состоянии системы, содержимое регистров и тип неисправности.

Информация о событиях по периферийному оборудованию обычно представляется в виде большого объема записанных данных. Тенденция к обнаружению и исправлению ошибок может быть использована не только при диагностировании отказов, но и для определения целей профилактического обслуживания, что дает возможность проводить его по мере необходимости, а не в заранее установленные сроки и таким образом снизить влияние неисправностей на результаты работы, как описано в гл. 2.

Выгода, приносимая применением журнала ошибок при диагностировании процессора, каналов или контроллеров периферийных устройств, в большой степени зависит от регистрируемой информации, которая в свою очередь зависит от типа ошибки и состояния встроенных средств контроля. Иногда эта информация находит незначительное применение, однако в других случаях можно зафиксировать состояние 5000 триггеров ошибок, предысторию отказа, содержимое регистров и состояние схем проверки четности, что повышает ремонтопригодность.

Информация, регистрируемая при неисправностях ЗУ, содержит адрес неисправной ячейки и, если имеются средства обнаружения и исправления ошибок, часто позволяет заменить соответствующие неисправные модули в периоды профилактического обслуживания.

В настоящее время все большее распространение получают программы анализа журнала ошибок, эти программы на основании информации, взятой из журнала ошибок, обнаруживают неисправности на модульном уровне: такой подход приносит довольно хорошие результаты для неко-

торых типов отказов, хотя эти отказы относятся к категории легко обнаруживаемых.

Вывод на пульт и дисплей

В состав большинства систем входят пульты и средства для индикации данных, команд, состояния, адресов памяти, кодов условий и т. д. вместе с соответствующими переключателями, определяющими цели выбора, а также средства пошагового выполнения программы с различной скоростью. Системы с повышенной ремонтопригодностью обладают средствами для индикации более разнообразной информации с возможностью одновременного вывода нескольких видов данных или динамическими дисплеями, обеспечивающими непрерывное отслеживание всей необходимой информации, а не избирательный вывод содержимого памяти в некоторый момент времени. При этом также возможна загрузка любой индцированной информации в журнал ошибок.

ИЗБЫТОЧНОСТЬ И РЕКОНФИГУРАЦИЯ

Избыточность, заключающаяся в многократном резервировании отдельных схем, не слишком часто встречается в вычислительных системах общего назначения. Иногда несколько блоков питания соединяются параллельно, чтобы при отказе части блоков мощность оставшихся была достаточной для питания. В ограниченном числе систем применяется дублирование важнейших каналов передачи данных (в основном для обеспечения целостности данных), причем в случае несовпадения данных могут предприниматься попытки преодолеть сбой путем повторения: при неудачной попытке можно пропустить быстрый диагностический тест, чтобы установить, имеет ли место устойчивая неисправность, и, если необходимо, исключить один из каналов. К недостаткам многократного резервирования следует отнести повышенную стоимость оборудования, необходимость расщепления схем для их проверки и увеличение вероятности одновременного отказа всех дублированных схем при неудовлетворительном качестве проектирования.

Довольно часто резервное оборудование покупается или система проектируется так, чтобы она могла функционировать при неполном комплекте средств и оборудования. В этих случаях система допускает проведение реконфигурации, чтобы избавиться от действия перемежающихся неисправностей, найти которые нет возможности, или устойчивых неисправностей, для устранения которых нет запасных частей, а также для обеспечения работы системы вплоть до наступления периода профилактического обслуживания. Перечислим важнейшие части вычислительных систем и основные возможности их реконфигурации:

1. Оперативное ЗУ или буферные ЗУ: перестройка абсолютной адресации, отключение неработающих секций, отмена или модификация чередования. В некоторых случаях при нарушении четности в ЗУ до начала реконфигурации, которая ведет к снижению производительности, ячейка проверяется для того, чтобы установить, является ли неисправность

устойчивой или произошел сбой; в случае сбоя информация выводится в журнал ошибок и неверно исполнявшаяся программа или модуль программного обеспечения перезагружаются без реконфигурации ЗУ.

2. Функциональные блоки процессора, такие как быстродействующие устройства умножения, механизмы перекодирования адресов для доступа к виртуальной памяти. Обычно используют имитатор программного обеспечения, функционирующий на резервном оборудовании .

3. Резервные линии передачи данных в каналы ввода-вывода, контроллеры или основное ЗУ. При наличии приемлемых устройств обнаружения ошибок часто их можно начинать использовать по назначению без прекращения выполнения программ или без перезагрузки операционной системы.

4. Резервное периферийное оборудование, контроллеры или каналы. Обычно после начала использования резервного периферийного оборудования отдельные пользовательские программы необходимо выполнить заново, по крайней мере с момента появления неисправности.

5. Микропроцессоры. Эффективность микропроцессоров сильно зависит от условий их применения. Системы передачи сообщений обычно включают в себя микропроцессор "горячего резервирования", который принимает входные данные, обрабатывает их, обновляет файлы, но не выдает выходной информации до тех пор, пока не откажет основная вычислительная машина; такие системы весьма чувствительны к ошибкам, допущенным на этапе создания аппаратуры или программного обеспечения, которые могут привести к одновременному отказу обоих комплектов.

Использование в универсальных многопроцессорных системах идеи "горячего резервирования" обычно неоправданно, и поэтому в них либо задания динамически распределяются по функционирующими процессорам, либо отдельные процессоры используются для решения конкретных задач. В обоих случаях отказ управляющего процессора или операционной системы чаще всего приводят к отказу всей системы.

Реконфигурацию вычислительной системы лучше всего организовать, используя специально разработанную панель или пульт реконфигурации, снабдив их гибкими средствами управления и визуализации для сокращения ошибок в действиях оператора при подключении резервных устройств.

Современные универсальные вычислительные машины обладают многочисленными возможностями для восстановления работоспособности после обнаружения отказа. К ним, например, относятся:

1. Быстрая перезагрузка операционной системы после того, как неисправности оборудования или ошибки программного обеспечения вызвали отказ системы, причем при перезагрузке операционной системы необходимо проверить целостность системы, что при наличии больших информационных массивов может занять достаточно много времени. Для сокращения этого времени проверка целостности выполняется одновременно с повторным запуском программ пользователей. В некоторых системах для максимально быстрого восстановления проверка целостности не производится в надежде на то, что искажение информации будет выявлено

лено соответствующими прикладными программами, после чего и будет организовано восстановление данных.

2. Запоминание очередей, чтобы можно было автоматически повторить неверно выполненные программы, выбрав их из соответствующих очередей. Программы пользователей, находившиеся в стадии выполнения, можно повторно включать во входной поток после аварии системы или неисправности, повлиявшей на отдельную программу, что позволяет избежать трудностей при сортировке выходной документации для выявления заданий, завершившихся успешно.

3. Дублирование каталогов файлов для сохранения целостности каталога файлов, так как каталог непрерывно подвергается обмену и в случае возникновения отказа легко может быть утрачен. При нарушении целостности каталога может потребоваться много времени для внесения в него утерянной информации о файлах.

4. Применение модульного принципа конструирования системы, обеспечение свойства самопроверяемости в составных частях оборудования и программного обеспечения и защита отдельных записей данных до тех пор, пока они не будут переданы следующим модулям.

Лучшим примером такого подхода являются периферийные процессоры или процессоры, включенные в сети, способные продолжать обмен данными с удаленными от них терминалами после того, как главная или следующая по ходу обработки процессорная система вышла из строя, и по крайней мере допускать постепенную деградацию системы или, даже более того, разрешать принимать данные, продолжая снабжение информацией основной памяти.

5. Системный подход к проектированию. При выборе соответствующих методов проектирования можно добиться такой организации системы, что отказы только важнейших модулей программного обеспечения или блоков оборудования повлекут за собой обязательную перезагрузку операционной системы.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Расходы на обслуживание

Основные затраты на обслуживание вычислительных систем, проводимое в рабочие смены, обычно изменяются примерно от 4% капитальных затрат в год для больших систем до 8–10% для мини-систем. Эти затраты почти одинаковы для систем с равными возможностями, но с довольно сильно отличающимися надежностными характеристиками. Обучение и другие накладные расходы увеличивают основные затраты также независимо от надежностных характеристик системы. При этом считается, что обычно подразделения обслуживания являются независимыми в финансовом отношении, и мероприятия по обслуживанию можно построить на основе компромисса между стоимостью запасных частей, рабочей силы и наблюдаемыми пользователем безотказностью и обслуживаемостью. В любой момент времени капитальные затраты на запасные части для систем, построенных из большого числа разнообразных элементов, со-

ставляют, по-видимому, от 3 до 10% первоначальной стоимости всего оборудования. Первоначальные затраты и затраты на пополнение обычно покрываются из той части бюджета, которая предназначена для оплаты обслуживания.

Необходимые ресурсы

В некоторых больших системах, сконструированных на основе функционального модульного принципа, объем запасного оборудования, которое может потребоваться для обеспечения необходимого уровня обслуживаемости и хранится на месте работы системы, достигает 30% объема процессора. В настоящее время все еще сохраняется тенденция содержать при больших вычислительных системах штат инженеров-ремонтников, наличие которого иногда трудно оправдать с экономической точки зрения. Например, в не очень надежной системе с 20 периферийными устройствами может потребоваться 40 исследований на 1000 ч со средним временем на одно исследование 1,5 ч, что эквивалентно примерно двум исследованиям, или 3 ч за рабочую неделю.

Кроме того, следует учитывать требования по профилактическому обслуживанию, которые могут привести к увеличению общего времени обслуживания в 3–6 раз, но и в этом случае общее время присутствия инженерного состава по-прежнему остается довольно малым. Однако так называемое обслуживание по вызову с естественным для этого способа 2-часовым ожиданием прибытия специалистов, как правило, не удовлетворяет пользователей больших вычислительных систем. В системах с низкой ремонтопригодностью ремонт более сложных неисправностей обычно ведется специалистами, и наилучшей процедурой обслуживания могло бы быть обслуживание по вызову при условии, что база специалистов по ремонту расположена достаточно близко к обслуживаемой системе.

Совершенно иначе формируется обслуживание групп мини-ЭВМ, расположенных достаточно далеко друг от друга; в этом случае применяется обслуживание по вызову, причем один инженер-ремонтник может обслуживать до 10 вычислительных машин. Средняя мини-ЭВМ может иметь 2,5 исследования на 1000 ч, или одно исследование на 10 нед. Поэтому инженер может быть занят ремонтным обслуживанием примерно 1 раз в неделю. Однако в рабочее время этот персонал кроме проведения профилактического обслуживания и переездов от одной машины к другой обычно привлекается для установки и наладки новых систем.

В настоящее время существует тенденция обеспечивать средние и малые системы дистанционными средствами диагностирования, когда система может быть подвергнута исследованию с помощью терминала, установленного в центре обслуживания. Цель дистанционного диагностирования заключается в том, чтобы дать возможность инженеру при поездке на место обслуживания взять с собой необходимое резервное оборудование. В указанных системах имеются те же трудности при диагностировании, о которых упомянуто в начале этой главы и которые хотя в большинстве случаев никак не проявляются, но возникают при появлении устойчивых отказов, когда практически всегда требуются запас-

ные части. Наличие специальных средств для проведения дистанционного обслуживания могло бы быть особенно полезно при изучении журнала ошибок для определения целей профилактического обслуживания и в тех случаях, когда квалифицированный представитель персонала поддержки делает запросы для предварительного диагностирования сложных отказов оборудования или программного обеспечения. Приведенные в начале этого параграфа требования к численности персонала, занятого ремонтным обслуживанием, основаны на данных, усредненных по времени, но, как указывается ниже, на коротких промежутках времени для решения тех же задач могут потребоваться значительно большие усилия.

ВЛИЯНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ

Измерения

Как указывалось в ряде случаев, показателем ремонтопригодности и отказоустойчивости могут служить следующие отношения:

Число технических исследований

или Число исследований на отказ

Число действительных отказов

и

Число событий, влияющих на действия пользователей

или Число событий

Число действительных отказов

на отказ

и время простоя, связанное с отказами, которое, как показано в гл. 7, измерять легче, чем полное время простоя на отказ. Таблицу 9.2 можно было бы рассматривать как пример классификации систем по качеству обслуживаемости (в графе "Полное среднее время простоя на отказ" не учитывалось время ожидания при обслуживании по вызову). Если система отказоустойчива, то приведенные в качестве критерия численные значения показателей должны быть уменьшены, поскольку в этом случае ведение исследований или возникновение событий не оказывает воздействия на работу пользователя.

Таблица 9.2. Измерение ремонтопригодности

Уровень ремонтопригодности системы	В запланированное рабочее время		
	Число исследований на отказ	Число событий на отказ	Полное среднее время простоя на отказ, ч
Очень высокий	1	2	2,0
Высокий	1,5	3,0	4,0
Средний	3,0	6,0	7,0
Низкий	6,0	12,0	10,0

Измерение на коротких периодах

Поскольку значения приведенных выше отношений (числа исследований или событий на отказ) являются усредненными по времени, полезно также рассмотреть те же отношения, вычисленные на коротких периодах.

На рис. 9.2 и 9.3 представлены 90%- и 99%-ные доверительные интервалы числа событий или исследований за некоторый промежуток времени в зависимости от среднего числа отказов и числа событий или исследований на отказ (СИО)¹. Кривые при СИО = 1 выведены из распределения Пуассона.

Примеры использования кривых:

Случай 1. Предполагается плановое проведение обслуживания с предсказанием безотказности системы по числу компонентов и интенсивности

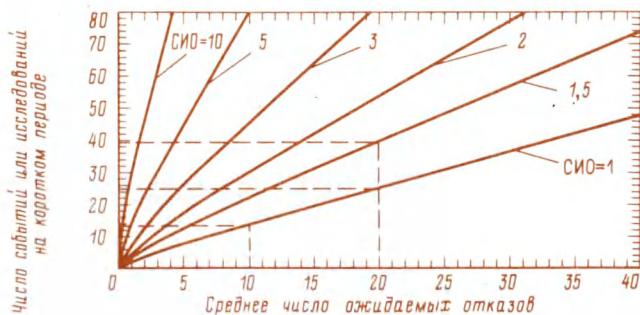


Рис. 9.2. Зависимость числа событий или исследований на коротких периодах от среднего числа ожидаемых отказов при 90%-ном доверительном интервале:

СИО – число событий или исследований на отказ. Пример. Ожидается, что на некотором периоде возникнет 20 отказов, причем СИО = 1,5 (иначе говоря, ожидается потребность в 30 исследованиях); в действительности число исследований на периодах равной длины будет не больше 39,5 в 90% периодов и не меньше 39,5 в 10% периодов

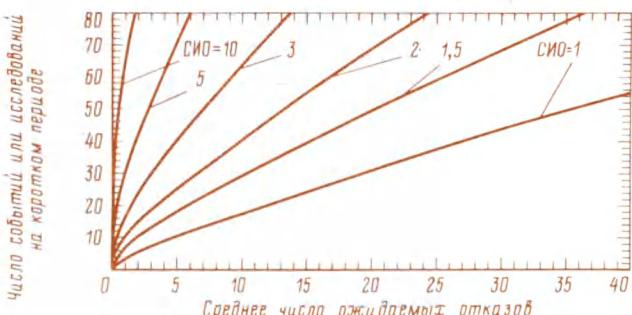


Рис. 9.3. Зависимость числа событий или исследований на коротких периодах от среднего числа ожидаемых отказов при 99%-ном доверительном интервале

¹ Кривые построены согласно формулам, приведенным в работе Р. Лонгботтома "Analysis of computer system reliability and maintainability". – The Radio and Electronic Engineer, december 1972, vol. 42, p. 12.

их отказов. Если, например, ожидается 20 отказов в месяц и желательно иметь достаточные ресурсы для полного обеспечения в 90% случаев отказов, то следует исходить из того, что может возникнуть 25 отказов в месяц согласно кривой, соответствующей на рис. 9.2 90%-ному доверительному интервалу по распределению Пуассона (СИО = 1). Если система обладает высокой ремонтопригодностью, т. е. в среднем требуется 1,5 исследования на отказ, то в действительности для исследований следует запланировать примерно 40 визитов ремонтников в месяц, а для систем с достаточно низкой ремонтопригодностью (СИО = 3) следует ожидать, что число таких визитов в месяц превысит 80.

Случай II. Пользователь ожидает, что в системе с характеристикой 5 событий на отказ происходит 2 отказа в месяц, т. е. в среднем ожидается 10 событий в месяц. Однако в действительности можно ожидать, что в 10% месяцев возникнут более 22 событий (кривая СИО = 5 на рис. 9.2), а не около 14, как это случилось бы, если бы все события носили случайный характер. Согласно рис. 9.3 для той же системы следует ожидать, что в 1% всех месяцев может произойти более 40 событий.

Рассмотренные примеры показывают, что действие перемежающихся отказов не только приводит к большему числу событий, но также резко увеличивает их число на коротких периодах вследствие эффекта возникновения пачек событий при одном первичном отказе. Кривые, приведенные на рис. 9.2 и 9.3, применимы к достаточно длинным промежуткам времени обслуживания системы (не менее недели); при более коротких периодах события из одной и той же пачки, по-видимому, будут попадать в соседние периоды, уменьшая тем самым разнообразие распределений событий по периодам. Подобным образом, если появление событий вызвано ошибками используемого метода проектирования, интенсивности событий в аналогичных системах будут в достаточной степени согласованы, пока применяется один и тот же метод их реализации. Однако если рассматривать разницу в числе ошибок проектирования в отдельных частях программного обеспечения или оборудования, то общий эффект будет подобен эффекту, определенному из рис. 9.2 и 9.3 в предположении, что число событий на отказ очень велико, например не менее 10. Приведем пример.

Ожидаемая интенсивность отказов, равная 15 событиям в месяц, эквивалента 1,5 отказа в месяц при СИО = 10. В 10% систем можно ожидать 36 событий (рис. 9.2), а в 1% систем – 73 события (рис. 9.3).

Так или иначе, вычислительные машины, в конструкцию которых заложены высокая ремонтопригодность и отказоустойчивость, обычно имеют наивысшую надежность со всех точек зрения и меньшее разнообразие проблем, требующих разрешения.

ПРИЕМОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

К моменту доставки вычислительной машины потребителю она уже подвергалась предварительным фабричным испытаниям. Однако в некоторых случаях их объем был очень ограничен, необязательно соответствовал условиям проектирования, и при некомплектной поставке периферийных устройств или нового программного обеспечения заказанная конфигурация может не выдержать испытаний как единая система (см. гл. 3).

После доставки ЭВМ процесс монтажа и ввода в эксплуатацию обычно занимает от 1 дня для мини-систем до 4 нед для больших универсальных систем. В течение этого времени одновременно с подключением различных частей происходит проверка уже установленных. По завершении всего процесса практически всегда предполагается проведение некоторой процедуры приемки, которая может представлять собой ограниченную часть предварительных заводских испытаний, но довольно часто единственным требованием потребителя является проведение всех технических испытаний без удовлетворения каких-либо специальных критериев. Во время приемки ведутся записи обо всех технических действиях и использовании резервного оборудования, хотя маловероятно, чтобы системный журнал подробно отражал все события и оценки качества делались при наблюдении любого недостатка.

По окончании описанных испытаний обычно потребитель подписывает акт о приемке системы. Во многих случаях следующим шагом является попытка потребителя запустить операционную систему. Однако даже в том случае, когда программное обеспечение успешно проработало в течение гарантийного срока, маловероятно, что его установленная версия будет удовлетворять пользователя.

С проведением этих стандартных процедур, по всей вероятности, после сдачи системы потребителю все же останутся необнаруженными некоторое число производственных дефектов, дефектов компоновки и значительные проектные недостатки, а также случайно утраченные или вновь приобретенные возможности, повреждения оборудования и ошибки в документации. Хотя с точки зрения поставщика система и защищена некоторой гарантией, но после официальной приемки и оплаты системы от поставщика трудно ожидать того же упорства в преодолении затруднений пользователя. Поэтому с точки зрения пользователя до внесения платы полезно иметь формальную процедуру приемки, специально разработанную для проверки его конкретных требований.

Идеальной формой приемочных испытаний могла бы быть такая, при которой можно было бы установить, что в отношении как оборудования, так и программного обеспечения реализованы все необходимые возможности, достигнуты заданная надежность и характеристики спецификации, а средства поддержки отвечают требованиям.

Испытания на надежность

Если предположить, что неисправности носят случайный характер, то длительность испытания на надежность может быть определена согласно экспоненциальному или пуассоновскому распределениям возникновения неисправностей (см. гл. 1).

Например, для вычислительной машины требуется испытание на надежность в течение 500 ч безотказной работы, когда заданная наработка на отказ равна 1000 ч. Если неисправности возникают в соответствии с экспоненциальным распределением, то вероятность безотказной работы или вероятность успешного завершения испытаний

$$P_S = 0,607 \text{ при } a = 500/1000;$$

иначе говоря, с вероятностью почти 40% возникнет один или более отказов, приводящих к неудаче при испытании, и маловероятно, чтобы такой уровень риска удовлетворил поставщика¹.

Подобным образом, если истинная наработка на случайный отказ равна 250 ч, вероятность успешного завершения равна

$$P_S = 0,135 \text{ при } a = 500/250,$$

т. е. существует 13,5%-ная вероятность того, что система, в 4 раза менее надежная, чем предполагалось, выдержит испытания. Такой уровень риска вряд ли может удовлетворить потребителя.

Единственный путь уменьшить риск поставщика и потребителя заключается в проведении испытаний такой длительности, при которой стала бы заметной вероятность возникновения более чем одного отказа. В этом случае можно использовать пуассоновское распределение для определения длительностей и рисков.

Пусть, например, в предположении случайного появления отказов при наработке на отказ, равной 1000 ч, и длительности испытаний 5000 ч критерием успешного завершения испытаний считается появление не более пяти отказов. Рассмотрим следующие пуассоновские распределения:

Число отказов X	Вероятность возникновения не более чем X отказов при среднем числе отказов 10,5	Вероятность возникновения не более чем X отказов при среднем числе отказов 2,62
0	0,000	0,073
1	0,000	0,264
2	0,002	0,513
3	0,007	0,732
4	0,021	0,875
5	0,050	0,950

Если отмечено пять отказов, то испытания завершаются успешно. Как указано выше, вероятность возникновения не более пяти отказов

¹ Принцип "риска" в приемных испытаниях заимствован из работы В. Барнетта и Х. Росса "Statistical properties of computer acceptance tests". – Ir. Statist. Soc. A., 1965, vol. 128, p. 361–394.

равна 0,05 при среднем числе отказов 10,5; иначе говоря, пользователь с 5%-ным риском принимает систему при реальном среднем времени между отказами

$$5000/10,5 = 476 \text{ ч.}$$

Если отмечено более пяти отказов, то испытания завершаются неудачей. В правом столбце приведенной выше таблицы, указано, что вероятность возникновения до пяти отказов равна 95% при среднем числе отказов 2,62, т. е. поставщик с 5%-ным риском может ожидать, что система не выдержит испытаний при реальном времени между отказами

$$5000/2,62 = 1908 \text{ ч.}$$

В табл. 10.1 приведены приблизительные 5%- и 95%-ные доверительные интервалы для пуассоновского распределения при различном числе отказов, а также длительности испытаний и наработка на отказ при 5%-ном риске, если ожидаемая наработка на отказ равна 1000 ч. Легко заметить, что чем дольше проходят испытания, тем меньше риск обеих сторон, а в качестве удовлетворительных следует принять испытания, по своей длительности в 25 раз превосходящие наработку на случайный отказ. Однако в рассмотренном случае это означает, что испытания будут длиться 25 000 ч, т. е. почти 3 года без перерыва. Испытания мини-процессора с заданной наработкой на отказ 10 000 ч потребовали бы около 30 лет.

Другими трудностями при проведении испытаний на надежность являются следующие:

1. Новая система подвержена ранним неисправностям (см. гл. 2), и это может потребовать до 12 000 ч для стабилизации ее безотказности.
2. Безотказность зависит от условий применения. В некоторых случаях можно использовать оборудование при более жестких условиях, чем предполагалось, и тем самым сократить время испытания. Возможны и другие методы ускорения испытаний: варьирование предельных режимов и условий окружающей среды.

Таблица 10.1. Длительность испытания на надежность при пуассоновском распределении отказов (при заданных доверительных интервалах и 5%-ном риске пользователя и поставщика)

Число зафиксированных отказов X	Истинное среднее число отказов при вероятности возникновения не более X отказов		Длительность испытаний, ч	5%-ный риск пользователя	5%-ный риск поставщика
	0,05	0,95			
0	2,94	0,05	500	170	10 000
1	4,76	0,36	1000	210	2810
5	10,5	2,62	5000	480	1910
10	16,9	6,17	10 000	590	1620
25	34,7	18,2	25 000	720	1370
50	63,3	40,0	50 000	790	1250
100	117,6	84,7	100 000	850	1180

П р и м е ч а н и е. Ожидаемая наработка на отказ 1000 ч; допускается возникновение не более X отказов.

3. Новое оборудование и программное обеспечение подвержены ошибкам проектирования (см. гл. 2, 3 и 5), поэтому результаты успешно завершившихся испытаний на надежность могут оказаться несправедливыми, если не обеспечить при этом реальную продуктивную пользовательскую работу пользователя системы в различных допустимых режимах и при обработке соответствующих последовательностей данных. Испытания на надежность специализированных систем, предназначенных для единственной области применения, например для передачи сообщений или бухгалтерских расчетов, можно проводить на системном уровне, иногда сокращая испытания до приемлемых размеров. В системах с переменным числом решаемых задач единственным правильным методом может быть измерение безотказности отдельных их частей.

4. Из-за возникновения перемежающихся неисправностей может, вероятно, показаться, что интенсивность отказов больше, чем она есть на самом деле, поэтому был бы желателен подробный анализ каждого события, чтобы подсчитать только число первичных отказов (см. рис. 1.2). Если бы была определенность относительно условий применения системы, то испытания можно было бы провести, выбрав в качестве критерия приемки интенсивность событий, задавшись интенсивностью случайных отказов и числом событий на отказ (см. гл. 9 и рис. 9.2 и 9.3). В табл. 10.2 приведены приблизительные 5%- и 95%-ные доверительные интервалы такого распределения событий при различном числе событий и числе событий на отказ, равном пяти, здесь же указаны длительности испытаний и наработка на отказ при 5%-ном риске при ожидаемой наработке на отказ 1000 ч и наработке на событие 200 ч.

Данные, приведенные в табл. 10.2, различаются еще больше, чем в табл. 10.1. Например, при продолжительности испытаний, в 25 раз превосходящей наработку на событие (т. е. 5000 ч), 5%-ный риск пользователя и поставщика определяется коэффициентами 0,42 и 3,1 соответственно, в то время как в табл. 10.1 эти коэффициенты равны 0,72 и 1,37 (также при длительности испытаний, в 25 раз превышающей наработку на отказ). Даже при испытаниях, продолжающихся 25 000 ч, согласно табл. 10.2 указанные коэффициенты равны 0,7 и 1,45. Отсюда ясно, что

Таблица 10.2. Длительность испытания на надежность при случайному распределении событий (при заданных доверительных интервалах и 5%-ном риске пользователя и поставщика)

Число зафиксированных событий Y	Истинное среднее число событий при вероятности возникновения не более Y событий		Длительность испытаний, ч	5%-ный риск пользователя	5%-ный риск поставщика
	0,05	0,95			
5	25	0,75	1000	40	1330
10	36	1,85	2000	56	1080
25	60	8,2	5000	83	610
50	95	23	10 000	105	430
100	153	59	20 000	130	340
125	173	85	25 000	140	290

П р и м е ч а н и е. 5 событий на отказ, наработка на событие 200 ч, допускается возникновение не более Y событий.

при испытаниях, когда регистрируются события, риск поставщика становится больше риска потребителя и минимальная продолжительность испытаний на надежность достижима лишь при анализе событий и определении их связи с реальными случайно появляющимися отказами.

5. Поскольку технические действия могут влиять на число фиксируемых отказов, следует принимать во внимание время простоя; обычным путем в этом направлении является измерение коэффициента обслуживаемости. Барнетт и Росс, ссылка на работу которых приводилась выше в этой главе, показали, что если в качестве критерия испытаний на надежность выбрать коэффициент обслуживаемости, эти испытания должны проводиться в течение периода, длительность которого в 25–50 раз превышает наработку на отказ. В этом случае действительно можно считать, что неисправности являются случайными, а время простоя подчиняется экспоненциальному или гамма-распределению. Результаты будут достаточно обоснованными, если события подробно анализируются для установления вызвавших их реальных отказов.

Проверка возможностей и измерение производительности

Если речь идет об оборудовании (см. гл. 3), то необходима довольно длительная эксплуатация вычислительной машины, чтобы добиться стабильной ее работы и устраниТЬ большинство логических ошибок, которые в основном приводят к явно более низкой безотказности, а не свидетельствуют о некорректности предоставленных возможностей. Некоторые испытательные программы специально разработаны для проверки правильности этих возможностей, другие программы служат для измерения скоростных характеристик оборудования, однако вовсе не обязательно, чтобы проверялись все комбинации и последовательности возможностей, которые могут встречаться при конкретном применении. Для достижения именно такой проверки идеальным средством было бы выполнение прикладных программ под управлением операционной системы.

Как указывалось в гл. 5, все возможности программного обеспечения практически невозможно проверить за конечное время, и охотно предоставляемые средства обычно не являются пригодными для измерения характеристик программного обеспечения. Кроме того, при непрерывном изменении программного обеспечения совокупность тестов, разработанных для одной версии программного обеспечения, может быть неприменима для другой версии. Единственный способ определения приемлемости программного обеспечения заключается в увеличении времени работы при загрузке системы отложенными прикладными программами, однако для большинства новых систем к моменту их доставки такую ситуацию создать невозможно.

Средства поддержки

Для определения эффективности средств поддержки также необходимы увеличенные интервалы времени. Поскольку аппаратурные и программные средства поддержки обычно поставляются по отдельным контрактам на обслуживание, длительность этих интервалов выбирается

включением в контракты таких критериев, как уровень обслуживаемости, время реакции и уровни допустимых нерешенных проблем (см. гл. 5 и 8). Уровни надежности оборудования и программного обеспечения на больших интервалах времени также могут быть определены в контрактах на обслуживание.

Очевидно, что на практике невозможно достичь той идеальной формы испытаний, при которой устанавливается факт соответствия безотказности, возможностей и производительности заданным заранее спецификациям. Дополнительные препятствия возникают при экономической оценке, и если приемные испытания требуют от производителя значительных финансовых расходов, то можно ожидать, что эти расходы возьмет на себя пользователь.

Приемочные испытания крайне желательны для многих новых вычислительных систем, и при их проведении следует принимать во внимание следующие практические соображения:

1. Испытания должны быть указаны в контракте вместе с условиями отказа от системы при невыполнении определенных критериев.

2. Испытания не должны налагать на пользователя слишком больших финансовых расходов, так что время и усилия по их подготовке и осуществлению должны быть ограничены.

3. Пользователь должен быть ответствен за определение программы испытаний, которая должна включать обработку пользовательских или других программ, обеспечивающих подобное или даже более исчерпывающее использование системы. Пользователь обязан наблюдать за прохождением испытания, проверять результаты и определять, успешно ли проходят испытания.

4. Должны быть представлены соответствующие записи о ходе испытаний и возникновении всех непредусмотренных событий.

5. Поставщик должен быть ответствен за исследование непредусмотренных событий, ремонт или исправление отказов или за обеспечение приемлемыми объяснениями.

6. Конфигурации оборудования и программного обеспечения, подвергающиеся испытаниям, обычно должны быть такими же, какими они будут использоваться в дальнейшем. При испытаниях следует убедиться, что все объекты, подлежащие идентификации, исследованы.

7. Во время испытаний следует попытаться установить, что система обеспечена широкими возможностями в отношении как оборудования, так и программного обеспечения, и с помощью ограниченного числа проверок определить, что из просмотренных возможностей не функционирует не такая их большая часть, как ожидалось.

8. Маловероятно, чтобы при испытаниях можно было установить, что система удовлетворяет заранее заданным критериям по долговременной безотказности, однако при чрезвычайно высокой интенсивности отказов, которая может иметь место тогда, когда оборудование некорректно смонтировано или введено в эксплуатацию (см. гл. 2), следует попытаться определить, что оборудование содержит достаточно мало ранних неисправностей, особенно если они имеют характер перемежающихся неисправностей.

В процессе выполнения пп. 3–7 следует уделить большее внимание опасности потери безотказности из-за некорректности разработки оборудования или программного обеспечения, но если эту опасность не удалось преодолеть за все время проведения испытаний, то, видимо, следует забраковать систему или считать приемку условной.

Особое внимание также следует обратить на отказы, вызывающие потерю целостности, нарушение секретности или физическую опасность потери информации, созданной пользователем на внешних ЗУ (см. гл. 6).

9. Следует установить, имеет ли место требуемая совместимость с другими системами или в пределах новой конфигурации системы, в том числе со сменными магнитными носителями.

10. Следует измерить оговоренную в спецификации производительность оборудования и попытаться установить производительность программного обеспечения и всей системы.

СТАНДАРТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Отдел технического обслуживания Центрального агентства по вычислительной технике был создан в 1958 г. (и назывался в то время отделом технической поддержки) для проведения профессиональных технических консультаций по вычислительным системам, приобретенным правительственными учреждениями. Позднее с развитием новой техники в отдел технического обслуживания были приглашены специалисты по программному обеспечению и эксперты в области передачи данных для проведения соответствующих консультаций и, если необходимо, непосредственной помощи.

Отдел технического обслуживания имеет различные подразделения, в функции которых входят выполнение тщательных оценок программного обеспечения, оборудования и систем большинства производителей: одни подразделения занимаются вопросами, касающимися программного обеспечения и разработки пакетов программ, другие – периферийным оборудованием, технологией, передачей данных, большими системами, мини-системами, системами подготовки данных, микропроцессорами, вопросами планирования деятельности службы снабжения и обслуживанием систем после их установки. Для выполнения работ по каждому проекту назначается руководитель технической поддержки (обычно с группой специалистов по системам и программному обеспечению либо оборудованию), в функции которого входит проведение консультаций на всех этапах приобретения вычислительной системы от изучения осуществимости системы и составления спецификаций, содержащих эксплуатационные требования, до выбора системы и составления мнения о ней. Этот же специалист ответствен за определение и руководство процедурой приемочных испытаний и во многих случаях может также быть ответственным за оценку конкретной системы или по крайней мере важнейшей ее части.

Обеспечение вычислительными системами ведется по стандартным контрактам, контролируемым отделом контрактов Центрального агент-

ства по вычислительной технике. Отдел контрактов, кроме того, взаимодействует с исследовательскими советами, университетами и медицинскими учреждениями от имени Центрального агентства, в соответствии с контрактом эти организации также получают от отдела технического обслуживания консультации и помочь при проведении приемочных испытаний.

Таким образом, эта организация создает очень серьезные предпосылки для выполнения испытаний. Действительно, в период 1958–1979 гг. отдел технического обслуживания обеспечивал определение процедуры и руководство приемочными испытаниями более чем 1600 систем и их усовершенствований, включая большинство видов систем, поставляемых основными производителями мини-ЭВМ и больших вычислительных машин общего назначения. Процедуры испытаний развивались в течение многих лет, приобретя к настоящему времени форму, описанную ниже. Тем не менее процедуры испытаний постоянно дорабатываются, и сейчас при условии, что по оценкам отдела технического обслуживания не обнаружено новых важных недостатков, испытания малых систем выполняются только для одного-двух первых образцов нового типа, а затем передаются пользователям и поставщикам с помощью других стандартных процедур.

Метод, процедуры, условия и обширные критерии успешности испытаний определяются как часть стандартного контракта. Подробные тесты со специальными критериями включаются в график, составляемый отделом технического обслуживания для каждой системы. Стандартные процедуры предусматривают заводские испытания и испытания на месте применения по назначению, причем номинальная длительность каждого испытания не превосходит 100 ч. Заводские испытания обычно проводятся только на первых произведенных моделях, чтобы гарантировать, что систему отправляют на место применения без критических недостатков в ее конструкции. Если система не выдержала испытаний после трех попыток, то контракт разрывается.

Испытания состоят из двух частей, называемых *демонстрациями* и *циклической проверкой*.

Демонстрации

Демонстрации следуют одна за другой в логической последовательности, причем не делается никаких предположений относительно того, корректно ли действуют проверяемые возможности: такой подход облегчает идентификацию любых событий, возникающих, когда проверки становятся более сложными. Рассмотрим отдельные фазы демонстраций.

Д1. Загрузка микропрограммы и запуск системы. Эта фаза обычно очень коротка, причем микропрограмма загружается с накопителя на гибких магнитных дисках или НМЛ кассетного типа, если таковой имеется в наличии, с последующей загрузкой любого программного обеспечения, необходимого для следующих проверок.

Д2. Проверки процессора, ЗУ и каналов ввода-вывода. Эта фаза включает в себя исполнение соответствующей испытательной программы

функционального типа для проверки процессора, запоминающего устройства и каналов ввода-вывода. Производятся измерения различных временных характеристик с использованием осциллографов и инженерных программ проверки временных характеристик. Часть этой фазы составляет подача стандартных эталонов, однако это делается на более позднем этапе после загрузки операционной системы. И, наконец, для обеспечения корректного выполнения процедуры выполняются проверки переключателей и ламп сигнализации.

Д3. Проверки периферийного оборудования. Для проверки каждой периферийной подсистемы по очереди пропускаются испытательные программы функционального типа. Выполняются измерения скорости передачи данных, других скоростей и емкостных характеристик; кроме того, проверяются рабочие режимы и форматы, а также схемы обнаружения и исправления ошибок; затем определяется исправность ламп сигнализации и переключателей каждого устройства и, наконец, проверяется возможность одновременного функционирования всех периферийных устройств.

Накопители на магнитных лентах и сменных магнитных дисках подвергаются испытанию на совместимость, чтобы определить, может ли информация, записанная на одном устройстве некоторого типа, быть считана на всех остальных устройствах того же типа. Идеальный тест совместимости, например для НМЛ, должен был предусматривать запись полной ленты на каждом устройстве и чтение ее на всех других. Такой подход практически неприемлем, поскольку, например, при наличии десяти устройств необходимо выполнить 100 циклов "запись–чтение", что может занять несколько часов работы. Поэтому обычно на каждом устройстве записывается часть файла, но каждой операции записи предшествует считывание информации, записанной на других устройствах. Если система укомплектована значительным числом однотипных накопителей, то во время испытаний проверке на совместимость подвергается лишь часть устройств, выбранных случайным образом.

Д4. Смешанная работа. Обычно эта фаза демонстраций включает обработку стандартного набора программ, предназначенных для использования в конкретных областях применения, например задач вычислительного характера (в основном программы, написанные на языке ФОРТРАН), задач автоматической обработки данных (главным образом программы, написанные на языке КОБОЛ). Часть этой фазы может включать обработку эталонных программ, представленных пользователем.

Д5. Проверка устойчивости к отказам, способности к изменениям структуры и возможности реконфигурации. Эти проверки, как правило, выполняются под управлением операционной системы и предназначены для того, чтобы определить, возможно ли отключение отдельных устройств без недопустимых последствий, может ли система подвергаться реконфигурации и в состоянии ли минимальная конфигурация продолжать продуктивную работу. На этом же этапе система может подвергаться операции "выключение–включение" в различные моменты, а также могут испытываться различные комбинации генераторов питания.

Д6. Специальные проверки. На этом этапе проводятся специальные проверки оборудования или, что более естественно, программного обеспечения, которые состоят в подаче подмножества тестов для операционной системы, трансляторов, средств преобразования, передачи, хранения и обработки различных видов данных, средств редактирования и проверки, диагностики и эмуляции.

Продолжительность. Номинальная продолжительность демонстраций, как правило, колеблется от 4 до 40 ч в зависимости от размера и сложности системы.

Критерии успешного завершения. Критерием успешного завершения демонстраций является успешное завершение всех фаз за номинальное время со 100%-ным допуском на его превышение (например, общее время заключено в интервале от 8 до 80 ч), причем любые временные соотношения не должны отличаться более чем на 5% от указанных в спецификации. Увеличение времени демонстраций задается для того, чтобы можно было исправлять возникающие отказы и предпринимать новые попытки продолжить испытания.

На первых образцах вновь разработанной модели фаза специальных проверок Д6 и проверки на эталонных программах могут выполняться после формальных начальных испытаний с выплатой определенной части стоимости после поставки требуемых по контракту средств или по достижении эксплуатационных качеств; сроки проведения указанных испытаний, естественно, оговариваются в контракте, и акт о приемке не подписывается до завершения испытаний.

Для содействия на этой фазе испытаний отделом технического обслуживания разработан генератор искусственных эталонов для моделирования процесса функционирования системы по назначению, когда прикладные программы еще не полностью отлажены.

Циклическая проверка

Используемые программы. Циклическая проверка – вторая часть приемочных испытаний – проводится в основном для того, чтобы испытать полную конфигурацию при оптимальном режиме взаимодействия и использования. Один цикл проверки составляется из перечисленных ниже типов испытаний продолжительностью примерно 15 мин каждый при работе машины в однопрограммном режиме, причем короткие программы могут объединяться в одну, а более длинные – разбиваться на несколько программ. Указанный период (15 мин) выбран так, чтобы после возникновения события повторить еще раз часть испытательной программы разумной длины.

1. Системонезависимые испытательные программы, выполняемые в однопрограммном режиме. Программы включаются в цикл проверки, так как зачастую являются единственными программами, позволяющими проверить все функции оборудования, пути передачи данных в ячейки памяти. Если есть возможность, заключительные части этих программ выполняются в мультипрограммном режиме под управлением операционной системы, конфигурация которой соответствует рабочим требова-

ниям пользователя. При выполнении этих программ можно убедиться в том, что операционная система перезагружается за установленное время.

2. *Тренировочные испытательные программы периферийных устройств и системы в целом.* Обычно это программы, предназначенные для проверок оборудования в самых тяжелых условиях применения по назначению. Иногда тренировочные испытательные программы для проверки программного обеспечения и системы в целом могут быть поставлены разработчиком.

3. *Программы пользователя.* Не так часто случается, чтобы пользователь имел отлаженные прикладные программы для новой системы или работу, характер которой постоянно меняется по мере ее выполнения, однако на этой стадии циклической проверки часто используются программы, разработанные на более ранних системах, и соответствующим образом исправленные типовые программы. При подборе программ пользователя следует позаботиться о том, чтобы они выполняли некоторые полезные функции, поскольку пользователи стремятся создавать короткие программы, работающие при необходимости в цикле, причем эти программы обрабатывают достаточно однотипные наборы данных, не содержат проверок совместимости и выводят на печатающее устройство большие массивы непроверяемых результатов. Наилучшей формой программ пользователя для систем, предназначенных для автоматической обработки данных, является комплект тестов проверки, сортировки, обработки и вывода данных, включающих на каждой стадии сравнение результатов с эталонным файлом, хранящимся на НМД или НМЛ, причем управление последовательностью выполнения этих тестов ведется с помощью предложений языка управления заданиями, вводимых с устройства системного ввода. В некоторых больших системах, предназначенных для использования в научных целях, иногда имеются в наличии подобные комплексы рабочих программ.

4. *Системные утилиты (вспомогательные программы).* Утилиты копирования очень полезны для обеспечения высокой степени использования периферийного оборудования, контроллеров и каналов при низкой занятости центрального процессора (испытательные программы для проверки периферийных устройств часто требуют значительных затрат времени центрального процессора для генерации и проверки данных). После нескольких фаз копирования полученные результаты могут быть проверены с помощью утилит сравнения, и при обнаружении ошибки может быть найден соответствующий неверный файл на НМД или НМЛ.

5. *Стандартные испытательные программы, написанные на языках высокого уровня.* Отделом технического обслуживания разработаны и написаны совокупности испытательных программ, в основном на языках ФОРТРАН, КОБОЛ, АЛГОЛ и БЭЙСИК, для преодоления недостатков программ пользователя и обеспечения транспортабельными программами, подобными тренировочным испытательным программам, которые могут выполняться под управлением операционной системы при максимальном уровне ее использования.

Тесты для процессора имеют небольшие массивы входных и выходных данных и охватывают максимально возможное число функций. В про-

граммах проверки арифметического устройства с плавающей запятой обрабатываются различные числа из широкого диапазона (но без потери переполнения или порядка); предпринята попытка довести любые обычно необнаруживаемые ошибки до заключительного результата, который строится так, чтобы его можно было легко проверить. В программах проверки арифметического устройства с фиксированной запятой разнообразными данными заполняют все разряды машинного слова, причем в этих программах предусмотрена возможность настройки на различную длину машинного слова.

Тесты для ЗУ проверяют всю необходимую память (если одной программой проверить всю память невозможно, то одновременно могут быть запущены две или более таких программ), заполняя различными комбинациями целые слова. Эти же программы могут использоваться для испытания системы страничной организации памяти, чтобы установить, принадлежит ли требуемая страница основному запоминающему устройству.

Тесты для НМЛ организованы таким образом, чтобы сильно загрузить лентопротяжный механизм при непрерывном процессе записи, перемотки ленты назад и считывания. Другие тесты НМЛ и НМД также используют различные комбинации данных и могут быть настроены на запись и считывание больших файлов или обработку нескольких файлов со случаем переходом от одного из них к другому. Кроме того, в тестах для НМД используются методы произвольного доступа для проверки правильности движения или переключения магнитных головок.

Тесты для медленных периферийных устройств (устройств считывания с перфокарт, карточных перфораторов, устройств ввода с перфоленты, ленточных перфораторов, дисплеев, пишущих машинок и построчно печатающих устройств) имитируются испытательными программами с соответствующими наборами данных и могут проверять полное множество символов. Эти же тесты полезны для проверок не только оборудования, сосредоточенного на вычислительном центре, но и удаленных от него устройств передачи данных.

Ряд таких стандартных испытательных программ, написанных на языке ФОРТРАН, приведен в приложении 1. Эти программы созданы в 1970 г. и постепенно начали применяться на всех больших системах и мини-системах наряду с программами, написанными на других языках, и были приняты в качестве стандартных тестов большинством поставщиков вычислительных систем.

Длительность. Обычно считается, что продолжительность различных циклов колеблется от 2 до 10 ч в зависимости от сложности системы и при этом не возникает никаких затруднений в обеспечении полноты и разнообразия условий применения даже очень больших процессоров. Часто появляются некоторые сомнения в возможности проверки распределения отдельных периферийных устройств или областей памяти, однако системный планировщик обычно может быть приведен в состояние отказа при освобождении периферийных устройств или путем выбора специальных последовательностей загружаемых программ.

Критерии успешного завершения. Цикл испытаний проводится до

тех пор, пока система последовательно не отработает шесть полных циклов без отказов. Один из критериев успешного завершения состоит в том, что каждое испытание должно успешно завершиться 6 раз подряд: это означает, что если некоторое испытание было прервано из-за возникновения отказа, то после возможного инженерного вмешательства его следует пропустить еще 6 раз; если же отказы оборудования или программного обеспечения вызвали полный останов системы, то все программы, выполнявшиеся в момент наступления отказа, должны быть заново пропущены дополнительно 6 раз. Штраф за неисправность растет по мере выполнения программы испытаний. Шестикратное повторение цикла также полезно для воспроизведения перемежающихся отказов.

Второй критерий заключается в том, что циклическая проверка должна быть завершена за номинальное время с 50%-ным допуском на его превышение (например, за $6 \cdot 10 + 0,5 \cdot 6 \cdot 10 = 90$ ч). Такое увеличение времени испытаний, с одной стороны, приемлемо в качестве одного из критериев для окончания испытаний хорошо функционирующей системы, а с другой – позволяет с уверенностью заключить, что ограниченное число совершенно случайных неисправностей, возникающих на поздних этапах испытаний, не обязательно приведет к отказу.

Роль инспектора

При испытаниях малых систем инспектор отдела технического обслуживания обычно руководит группой поддержки оборудования и системы программного обеспечения и может получать некоторую помощь со стороны пользователя. В приемке больших систем вместе с инспектором и ассистентами, проводящими экспертизу по системе в целом, либо по программному обеспечению, либо по оборудованию, участвуют также два (или больше) руководителя технической поддержки отдела технического обслуживания. Другие специалисты отдела технического обслуживания либо находятся на месте установки системы, либо при необходимости могут быть вызваны. Роль инспектора состоит в том, чтобы обеспечить ведение адекватных записей, наблюдать за соблюдением точности при проверке результатов, за функционированием системы и действиями представителя поставщика по техническому обслуживанию, принимать на себя руководство при тестировании отдельных неисправностей, а также определять любые изменения последовательностей выполнения программ. Можно считать, что действия инспектора во всех случаях могли бы быть согласованы до начала испытаний, однако, к сожалению, вычислительные системы слишком сложны, чтобы все возможные случаи могли быть проанализированы. Кроме того, явно неудачное завершение любого испытания или демонстрации может быть вызвано причинами, которые находятся вне контроля поставщика и на которые не накладывается штраф, поэтому в функции инспектора входят постоянное обсуждение или объяснение всех возможных причин (или оправдание) происходящих явлений, будь то ошибки оператора, программные ошибки, канцелярские ошибки, запыленность, изменения параметров окружающей среды или резкие изменения напряжения электросети (или даже муха, из-за которой

кто-то предъявил претензии, заметив ее полет между лампой и фотоэлементом устройства считывания с перфоленты!).

Инспектор также совместно с пользователем несет ответственность за составление рекомендаций по приемке для отдела контрактов, которые включают определение суммы штрафа за влияние любых необъясненных событий или непонятных отказов на работу пользователя и принятие решения по условному окончанию приемных испытаний.

Отчетные документы

Основной отчет об испытаниях содержится в системном журнале, где зарегистрированы важнейшие события, временные характеристики, измеренные на этапе демонстрации, и моменты запусков и остановов. Инспектор составляет приложение к системному журналу с кратким описанием всех непредвиденно появившихся событий, по каждому пункту которого представитель поставщика обязан дать письменный ответ. Специальная ведомость, в которой делаются отметки о прохождении циклической проверки, предназначена для того, чтобы определить, какие испытания завершены успешно, а какие следует повторить заново. В тех случаях, когда выполняется большое число программ, могут вестись ведомости, в которых отмечаются результаты проверки выходных данных. В сложных системах может регистрироваться факт использования отдельных периферийных устройств, однако часто это оговаривается заранее в графиках проверки.

Графики проверок

Графики проверок составляются отделом технического обслуживания совместно с пользователем до начала испытаний и состоят из следующих частей:

1. *График 1.* До начала испытаний должны быть оговорены номинальная и допустимая продолжительности отдельных проверок, дата проведения испытаний; кроме того, должны иметься в наличии перечень оборудования и его модификаций, описание программного обеспечения и уровень его реализации, документация, относящаяся к отдельным испытаниям, описание процедур обслуживания и перечень их модификаций, комментарии к программному обеспечению и т. д., а также описание конфигурации системы.

2. *График 2.* Краткое описание демонстраций; отдельные бланки (по возможности стандартного вида) для отметок о ходе каждой фазы демонстраций, о качестве функционирования каждого типа устройств или частей программного обеспечения, где указаны цели и метод проверки, критерии успешного завершения и предполагаемая длительность.

3. *График 3.* План циклической проверки, в котором содержатся названия испытаний и используемых программ, их назначение или описание, время работы в однопрограммном режиме, время работы центрального процессора и продолжительность использования периферийного оборудования, необходимые приборы, объемы занимаемой памяти и критерии успешного завершения (в том числе любые временные характеристики,

измеряемые при согласовании процессов, исправлении допустимых ошибок и т. д.).

4. *График 4.* Порядок проведения циклической проверки (например, определение групп тестов, которые должны загружаться одновременно) с описанием допустимых перестановок и, если требуется, порядка реконфигурации и замены периферийных устройств, необходимых для проведения каждого цикла.

5. *Общие замечания*, содержащие отдельные требования и разъяснения правил проверки конкретной системы.

Результаты испытаний

Коэффициент успеха. Одним из способов оценки эффективности метода испытаний является определение коэффициента успеха, равного отношению числа успешно завершившихся испытаний к числу неуспешных. В недавно проведенных Центральным агентством по вычислительной технике 400 испытаниях получены следующие результаты:

успешно завершено 62% испытаний,

условно завершено 24% испытаний,

не завершено 14% испытаний.

Таким образом, значительное число испытаний не завершено или завершено условно; в последнем случае покупатель может воздержаться от части выплат до тех пор, пока все условия контракта не будут удовлетворены. Менее половины испытаний проводилось на мини-системах, и примечательно, что процент неуспешных и условно завершенных испытаний соответствует приведенным числам. Вероятно, что этот факт является еще одним отражением низкого качества мини-систем. Анализ неуспешных и условно завершенных испытаний самых современных больших систем, предназначенных для научных целей, и мини-систем показывает следующее:

Причины неуспешных испытаний	Число случаев
Программное обеспечение не поддерживает систему	4
Не удовлетворены требования по быстродействию	2
Неверны результаты обработки программ	1
Чрезмерно большое число недостатков программного обеспечения .	2
Чрезмерно большое число событий (в оборудовании и программном обеспечении)	13
Чрезмерно большое число событий в центральном процессоре	7
Чрезмерно большое число событий в периферийном оборудовании..	4
Отсутствие поддержки	1
Не отвечающая требованиям конфигурация оборудования	1
Итого:	35

В семи случаях (первые три причины) системы обладали важными недостатками и не должны были бы предъявляться к испытаниям, остальные причины неудачного завершения обусловлены чрезмерным числом событий, являющихся следствием некорректной подготовки к эксплуатации и испытаниям.

<i>Причины условного завершения испытаний</i>	<i>Число случаев</i>
Отсутствие программного обеспечения	3
Недоставки оборудования	5
Поставки непредусмотренного оборудования	1
Одно или два неисправных периферийных устройства	15
Некомплектность программного обеспечения	7
Необъясненные события	11
Недостатки документации	3
Внешние повреждения (неудовлетворительный внешний вид)	4
Неудовлетворительная безопасность	3
Некомплектность испытательных программ	1
Невыполнение предусмотренной демонстрации	1
Итого:	54

Перечисленные выше случаи отсутствия каких-либо устройств, как и частей программного обеспечения, обычно выявляются перед началом испытаний. Оставшиеся случаи в основном наблюдаются по мере развития испытаний, но факт приемки системы зависит от того, будет ли ликвидирован дефицит. Особого внимания требуют вопросы обеспечения безопасности – дефекты этого рода в основном свойственны оборудованию и легко выявляются при подаче повышенного напряжения или осмотре подвижных частей; приемка возможна лишь после получения гарантий, что все дефекты исправлены. Во многих других случаях модифицированные средства обеспечения безопасности уже имелись в наличии.

Десять лет назад 25% испытаний заканчивалось неудачей; в настоящее время удалось достичь прогресса с помощью усовершенствований, связанных с применением более надежного современного оборудования, проведением изготовителями более тщательных приготовлений к испытаниям и возникновением, тенденции к условному завершению испытаний, что дает возможность пользователю начать работу на частичной конфигурации системы.

Деятельность, предшествующая испытаниям. Поскольку изготовителям заранее известно содержание испытаний и у них есть стимул к проведению надлежащей подготовки и репетиций, большая часть испытаний должна была бы заканчиваться успешно. Однако даже при успешно завершенных испытаниях следует заглянуть в будущее, чтобы понять, какие дополнительные усилия потребуются и какие неисправности могут быть выявлены во время этих испытаний.

Изготовитель обязан предоставить к началу испытаний основной файл выходных данных, и это вынуждает его к проведению всех демонстраций и по крайней мере одного полного цикла циклической проверки до начала испытаний. Такие действия обеспечивают проведение предварительных испытаний, длительность которых с учетом времени отладки и устранения неисправностей по меньшей мере равна длительности официальных испытаний. Из-за необходимых приготовлений очень немногих испытаний заканчиваются точно в срок, а на больших системах задержка часто достигает нескольких недель, и это совершенно естественно, поскольку период "выжигания" дефектов оборудования гораздо больше, чем номинальная длительность испытаний. Кроме того, имея в виду обязательства, опреде-

ляемые контрактом на испытания, для разрешения проблем, возникающих на этапе предварительных испытаний, изготавитель обычно привлекает специалистов по обслуживанию, обладающих более высокой квалификацией, чем технический персонал, занятый установкой обычновенных коммерческих систем или участвующий в испытаниях, проводимых пользователем или изготавителем по методике Центрального агентства по вычислительной технике. Помимо более высокого уровня поддержки и увеличенного времени выполнения программ на этом этапе жизни системы обеспечивается также более интенсивной проверкой результатов испытательных программ, обязательным ведением записей о ходе испытаний и консультациями со стороны официального инспектора.

Неисправности, устраниемые во время испытаний. Во время испытаний обнаруживается и устраняется значительное число неисправностей. Данные о неисправностях, собранные по итогам 100 приемных испытаний, были подвергнуты детальному исследованию¹. В общей сложности эти испытания включали около 2300 ч выполнения испытательных программ на 88 различных системах почти с 800 периферийными устройствами, при чем 23 из 100 испытаний закончились неуспешно.

На рис. 10.1 отражены данные по безотказности, зарегистрированные за время демонстраций и циклических проверок для всей совокупности устройств. Интенсивность отказов на этапе демонстраций меньше, чем на первом цикле испытаний, поскольку загрузка устройств ниже. Увеличение интенсивности отказов на третьем цикле происходит вследствие недопустимых отклонений параметров электромагнитных периферийных устройств из-за высокой активности последних. Необходимо помнить, что после фиксации отказа испытания повторяются с первого цикла, что помогает выявить любые дальнейшие отказы, вызванные перенастройкой устройства.

Важно заметить, что во время демонстраций было обнаружено, что 4% запоминающих устройств на магнитных дисках и лентах оказались несовместимыми и 1,5% устройств обладали недопустимо низким быстродействием. Особое значение также следует придавать отказам, к которым

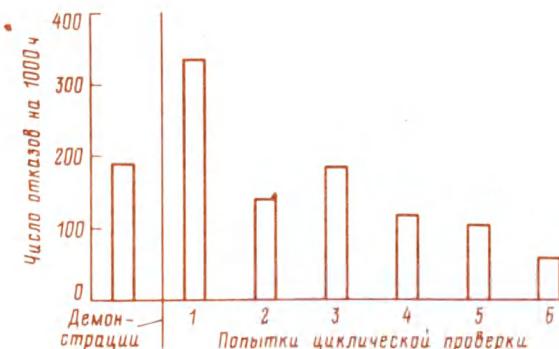


Рис. 10.1. Безотказность, зарегистрированная во время приемных испытаний различных устройств (зарегистрировано 399 отказов) (из журнала "The Post Office Electrical Engineers Journal")

¹ См. работу Р. Лонгботтма и К. Стоута в журнале "The Post Office Electrical Journal", July 1972, vol. 65, p. 2.

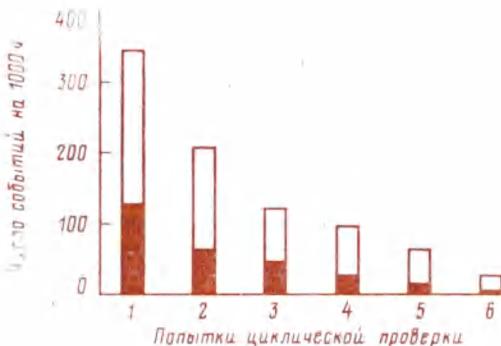


Рис. 10.2. Распределение перемежающихся отказов, зафиксированных за время приемных испытаний (из журнала "The Post Office Electrical Engineers Journal"):

■ — события, имевшие место вследствие первого проявления 95 отказов; □ — события, происшедшие при повторном проявлении 183 событий

приводят необнаруживаемые обычным путем ошибки (подробное обсуждение этих ошибок проводилось в гл. 6).

На рис. 10.2 отражены данные о возникновении перемежающихся отказов, зарегистрированных при испытаниях, во время которых 95 отказов привели к 278 событиям. Отсюда видно, что шести циклов достаточно для воспроизведения перемежающихся отказов. При проведении испытаний было подсчитано, что среднее время, необходимое для воспроизведения события при выполнении обнаруживающей его программы, равно 20–30 мин. Примерно половина перемежающихся отказов возникает во время обработки программ пользователем, и только 20% из них выявляются испытательными программами, применяемыми при испытаниях, хотя в большинстве случаев эти программы отрабатываются поочередно с программами, на которых обнаружен отказ.

При неуспешных испытаниях их возобновление задерживается, поскольку поставщик проверяет, что все неисправности выявлены и исправлены, и пытается установить, что в дальнейшем не возникнет других важных неприятностей. Примерно 10% систем, испытания которых закончились неуспешно в первый раз, не проходят испытаний и во второй раз, и требуется значительно больший объем проверок и репетиций испытаний, чтобы избежать разрыва контракта. С 1958 г. лишь в двух случаях системы не прошли испытаний после трех попыток, оборудование было полностью возвращено поставщику и заменено другим. Во многих других случаях (в некоторых из них условного завершения испытаний контрактом не предусматривалось) процессоры дорабатывались до новой их модели, поставлялись дополнительные или другие запоминающие устройства, периферийные процессоры или процессоры передачи данных или же цена системы снижалась.

Достоинства и недостатки процедур испытаний Центрального агентства по вычислительной технике

Основные достоинства стандартных процедур испытаний, разработанных Центральным агентством по вычислительной технике:

1) процедуры испытаний разработаны специалистами по вычислительным системам, а сами испытания проводятся под их руководством. Кроме того, тесты, составленные специалистами, обладают несомненными

достоинствами, пользователь и поставщик могут оставаться в довольно дружеских отношениях после окончания приемки, поскольку большинство спорных вопросов решается инспектором и поставщиком;

2) в графиках проверки ясно установлено, что должно быть проверено и каковы критерии успешного завершения испытаний;

3) испытания не являются испытаниями на надежность, однако они должны завершиться на хорошо работающей системе; на практике эта цель обычно достигается;

4) загрузка оборудования во время испытаний обычно больше, чем на ранних этапах пользовательской деятельности.

Основные недостатки процедур испытаний:

1) производители заранее знают, какие программы должны обрабатываться во время испытаний, но их содержание и разнообразие может не соответствовать характеру пользовательской работы. Этот недостаток до некоторой степени преодолевается сильной загрузкой и разнообразием работ, поскольку испытания включают обработку до 400 различных программ;

2) продолжительность испытаний может оказаться весьма небольшой. Как указывалось выше, этот недостаток компенсируется дополнительной подготовкой и репетициями испытаний у изготовителя. Кроме того, после формальных испытаний для первых образцов новой продукции Центральным агентством по вычислительной технике предусмотрены более обширные проверки программного обеспечения и проверки на типовых задачах;

3) необходимы дополнительные усилия при подготовке и прохождении испытаний, что может повлечь за собой увеличение стоимости.

Чтобы понять, насколько значительны описанные преимущества и недостатки, полезно исследовать другие формы приемных испытаний, применяемых на практике.

Устаревшая стандартная процедура испытаний Центрального агентства по вычислительной технике

До 1968 г. Центральным агентством по вычислительной технике проводились испытания, подобные современным, примерно той же длительности, с фазами демонстраций и циклической проверки, однако один из основных критериев заключался в том, чтобы измеренный коэффициент обслуживаемости не снижался ниже 93%. Второй критерий был основан на вычислении коэффициента производительности:

$$\text{Коэффициент производительности} = \frac{\text{Число корректно отработанных испытаний}}{\text{Общее число испытаний}},$$

причем испытание считалось неудачно завершенным при возникновении серьезного события или последовательности второстепенных событий. Критерий состоял в том, что этот коэффициент не должен был падать ниже 96%.

Новая процедура испытаний разрабатывалась для того, чтобы избежать измерения безотказности, упростить ведение отчета об испытаниях; сде-

лать процедуру более гибкой (например, допустить частичную приемку), а проверку менее зависимой от квалификации инженеров-ремонтников.

ПРОЦЕДУРЫ ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ

При процедуре испытаний, развитой позднее, поставщик устанавливает систему по своему усмотрению, а затем передает ее пользователю для испытания, включающего функционирование в рабочем режиме. Такая процедура определена стандартным контрактом Главного управления по обслуживанию, которым пользуются правительственные учреждения США. Стандартные критерии состоят в том, что коэффициенты обслуживаемости системы должны быть не ниже 90% за 30-дневный период, а испытания должны завершаться за 90 дней. Эта же процедура принята в качестве стандартной правительствами многих европейских стран. Преимущества этой процедуры:

- 1) при испытаниях обработка различных программ может занимать до 720 ч;
- 2) обрабатываемые программы частично отражают характер дальнейшей работы пользователя, причем поставщик заранее не знаком с ее содержанием и поэтому не может настроить систему так, чтобы избежать трудных ситуаций.

Среди недостатков отметим следующие:

- 1) пользователи могут не иметь достаточного объема новых программ для обеспечения полной загрузки системы (для повышения загрузки могут быть использованы программы, аналогичные приведенным в приложении 1);
- 2) к началу испытаний знания пользователя о системе могут быть довольно ограниченными, в результате чего он легко может быть введен в заблуждение; в некоторых случаях пользователь может выбрать особенно тяжелую для системы стратегию испытаний и потратить необоснованно много времени;
- 3) процедура является по существу процедурой испытаний на безотказность. Для средней системы с потенциальным коэффициентом обслуживаемости не менее 96% с точки зрения пользователя 90%-ный критерий не так уж хорош; действительно, при продолжительности испытаний 720 ч обычно существует 5%-ная вероятность того, что система с 85%-ным коэффициентом обслуживаемости будет принята, а система с коэффициентом обслуживаемости 94% не пройдет испытаний.

Чтобы устраниТЬ последний недостаток, в специальных случаях испытания выполнялись с условием достижения не менее чем 95%-ного коэффициента обслуживаемости за 90 дней и с дополнительными критериями, позволяющими охватить частоту аварийных отказов системы; кроме того, вводились условия, касающиеся обработки типовых задач, удовлетворения заранее определенных критериев и проверки возможностей программного обеспечения.

Наилучшей формой испытаний являются, по-видимому, процедуры, подобные разработанным в Центральном агентстве по вычислительной технике, вслед за которыми следуют процедуры, аналогичные процедур-

рам Главного управления обслуживания с более жесткими критериями. В некоторых случаях последние применяются Центральным агентством по вычислительной технике.

Глава 11

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Общие замечания

В гл. 1 были рассмотрены основные идеи стандартного метода расчета надежности (точнее, безотказности) электронного оборудования, основанного на данных о числе отдельных компонентов. Трудности, связанные с описанием неисправностей и необходимость изучения проблемы ремонтопригодности объяснены и исследованы в других главах. В гл. 3 показано, что отношение безотказности процессоров базовых конструкций и мини-процессоров, построенных на ИМС, может доходить до 142:1 в пересчете на одну ИМС и зависит от сложности ИМС, быстродействия, условий окружающей среды и качества разработки. Было показано также, что процессоры с эквивалентным быстродействием могли бы быть более надежными, если их создавать из большего числа ИМС; кроме того, более полная загрузка приводит к снижению безотказности даже электронного оборудования.

Учитывая все сказанное, трудно понять, как можно делать осмысленные предсказания надежности, если использовать лишь известный опыт применения одних и тех же компонентов и установленные процедуры управления разработкой и качеством. Затруднения еще более усиливаются, если использовать метод предсказания надежности ИМС, приведенный в справочнике MIL Handbook 217B, где указаны пределы изменения следующих коэффициентов, отражающих различные причины снижения надежности:

*Пределы
изменения
коэффи-
циента*

1–2,5

1–4,0

1–150

Коэффициенты

Коэффициент сложности, зависящий от среднего числа логических элементов в интегральной микросхеме (это число меняется от 1 до 4).

Коэффициент влияния окружающих условий, отражающий различие в результатах вычисления в основных "облегченных" и заданных режимах, причем к показателям облегченного режима следует отнести обеспечение полного кондиционирования воздуха: этот фактор также принимается во внимание при оценке надежности из-за изменения внутренней температуры интегральных микросхем.

Коэффициент качества, зависящий от корректности и качества разработки и изготовления. Приведенные пределы изменения относятся к компонентам, предназначенным для использования как в обычных коммерческих, так и в лучших военных системах; поэтому можно ожидать, что диапазон изменений для вычислительных систем окажется несколько меньшим

Центральный процессор

На рис. 11.1 отражены практические характеристики центральных процессоров (без оперативной памяти): число исследований на 1000 ч в зависимости от быстродействия, измеряемого в тысячах команд в секунду (определение этой единицы

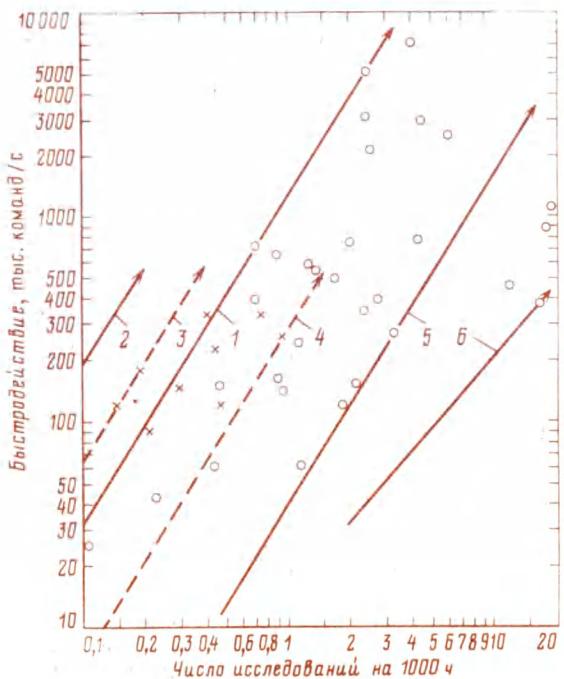


Рис. 11.1 Интенсивности исследований и быстродействие установленных семейств центральных процессоров (без запоминающих устройств):

- – процессоры базовых конфигураций; × – процессоры мини-систем;
- 1 – лучшие базовые конфигурации; 2 – лучшие мини-системы, функционирующие в хороших окружающих условиях; 3 – лучшие мини-системы; 4 – худшие мини-системы; 5 – худшие базовые конфигурации с низкой ремонтопригодностью; 6 – худшие базовые конфигурации в плохих окружающих условиях

измерения дано в приложении 3). Каждая точка соответствует мини-процессорам или процессорам базовых конфигураций некоторого типа, которые в настоящее время все еще заняты обслуживанием пользователей. Большинство кривых построено для больших совокупностей вычислительных машин, и лишь несколько из них отвечают мелким семействам.

Существующие данные о микропроцессорах позволяют заключить, что их характеристики соответствуют характеристикам мини-ЭВМ с низким быстродействием.

Процессоры базовых конфигураций обычно используются при хороших окружающих условиях, поэтому можно считать, что различие одинаково быстродействующих процессоров определяется особенностями разработки, их качеством и наличием свойства ремонтопригодности. Отношение числа исследований на 1000 ч для лучших и худших конструкций процессоров базовых конфигураций доходит до 8, а для лучших и тех, которые имеют слабую ремонтопригодность, даже до 34. Поскольку надежность семейства самых плохих систем не совсем точно отражает качество отдельно взятой установленной системы (см. гл. 2), необходимо учесть различные факторы, влияющие на интенсивность исследований, введя соответствующие поправочные коэффициенты:

Качество	Поправочный коэффициент
Высокое	1
Среднее	2
Низкое	5

Приведенные значения отражают различие средней безотказности отдельных вычислительных машин в первые 10–12 тыс. ч обслуживания пользователей при условии, что процессоры не являются первыми образцами нового выпуска. Подобное различие средней безотказности, но для коротких периодов функционирования дано ниже:

<i>Ремонтопригодность</i>	<i>Поправочный коэффициент</i>
Хорошая	1
Средняя	2
Плохая	4

На рис. 11.1 отражены интенсивности исследований, соответствующие значениям, равным 1,5; 3 и 6 исследований на отказ. Значения поправочных коэффициентов могут быть не пропорциональны быстродействию процессора и оказывают гораздо меньшее влияние на малые системы, составленные из относительно небольшого числа сменных модулей.

Можно считать, что мини-процессоры функционируют в среднем как в хороших, так и в плохих условиях окружающей среды, и поэтому естественно полагать, что точки, соответствующие лучшим образцам, используемым в хороших условиях, расположатся вдоль соответствующей прямой, приведенной в левой части рис. 11.1, а коэффициент влияния окружающих условий следует взять из приведенной ниже таблицы, которая в свою очередь заимствована из справочника MIL Handbook 217B. Поскольку микропроцессоры рассеивают очень незначительное количество тепла, большую часть различных сочетаний разнообразных окружающих условий можно считать хорошей, поскольку температурный режим является одним из важнейших факторов, определяющих качество окружающих условий функционирования.

<i>Окружающие условия</i>	<i>Поправочный коэффициент</i>
Хорошие	1
Средние	2
Плохие	4

Поправочный коэффициент отражает все изменения окружающих условий, о которых говорилось в гл. 4, и для худшего случая реальных окружающих условий можно ожидать, что значение поправочного коэффициента будет значительно больше.

Как отмечалось в гл. 3, уровень загруженности может влиять на надежность процессоров и стать даже основной причиной ее снижения при низком качестве процессоров. Приведенные ниже поправочные коэффициенты пригодны для отражения влияния уровня загруженности, особенно в начальный период жизни устройства.

<i>Загруженность</i>	<i>Поправочный коэффициент</i>
Очень низкая	0,25
Низкая	0,5
Средняя	1,0
Высокая	2,0

При изучении только ранних неисправностей, возникновение которых можно ожидать на некоторых новых машинах независимо от того, являются они новыми моделями или нет, следует принимать во внимание следующие поправочные коэффициенты, представляющие собой средние значения, полученные для отдельных машин разного качества на семи первых периодах обслуживания, равных одному рабочему году (2000 ч) :

Качество в 1-й рабочий год (расматриваются только ранние неисправности)	Поправочные коэффициенты для каждого 2000 ч обслуживания пользователей на первых периодах обслуживания						
	1	2	3	4	5	6	7
Высокое	1,5	1	1	1	1	1	1
Среднее	4,5	2,5	1,5	1	1	1	1
Низкое	10	7	5	4	3	2	1

Кроме того, как было показано в гл. 2, к дополнительному снижению надежности первых образцов новой модели приводят ошибки проектирования, поэтому

при оценках, производимых для указанных устройств, следует учитывать следующие поправочные коэффициенты:

Качество в 1-й рабочий год (принимаются во внимание только ошибки проектирования)	Поправочный коэффициент
Высокое	2
Среднее	2,5
Низкое	3

Приведенные коэффициенты используются только для первых экземпляров вновь разработанных моделей в первые 6–12 мес их функционирования. В других случаях для последовательных годовых периодов есть возможность использования дополнительных коэффициентов, зависящих от конкретных мероприятий производителя, которые иногда приводят к изменению характеристик по ранним отказам. Комбинации различных уровней качества и загруженности должны покрывать большинство ситуаций, встречающихся на практике.

П р и м е р. Рассмотрим два процессора со средним уровнем загруженности, работающих в хороших окружающих условиях, но отличающихся уровнями ремонтопригодности (у одного хорошая, у другого плохая), и определим для них границы изменения интенсивности исследований по годам, начиная с момента выпуска первой системы. Предполагается, что быстродействие обоих процессоров равно 1200 тыс. команд/с, чему согласно рис. 11.1 соответствует наилучшая интенсивность исследований, равная примерно 1 за 1000 ч:

Качество и ремонтопригодность	Число исследований на 1000 ч для процессоров нового типа за первые 6 лет						Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	
Высокое	3	1	1	1	1	1	1,3
Низкое	120	28	20	16	12	8	34

Оперативное запоминающее устройство

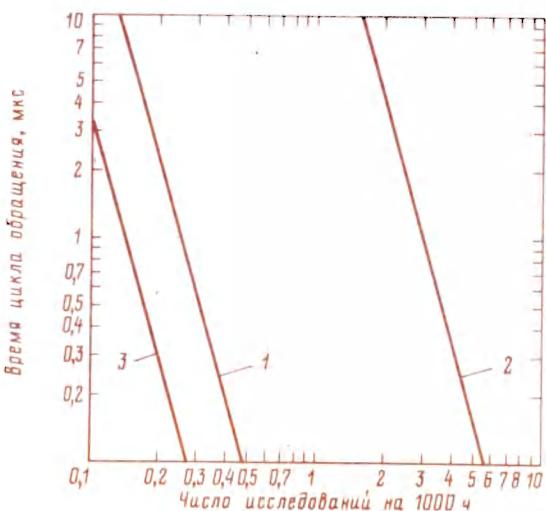
На рис. 11.2 приведены границы изменения числа исследований на 1000 ч для ЗУ на магнитных сердечниках с различным временем цикла обращения к памяти. Из рисунка видно, что отношение интенсивностей исследований для лучших и худших моделей с одинаковым временем цикла обращения равно примерно 1:10. Поскольку ЗУ на магнитных сердечниках имеют симметричную структуру и построены в соответствии с конструктивным модульным принципом, их ремонтопригодность, если иметь в виду интенсивность исследований, несколько выше, чем ремонтопригодность процессоров. Можно считать, что коэффициент ремонтопригодности обычно изменяется от 1 до 2, а коэффициент качества такой же, как и для процессора, хотя большинство ЗУ обладает средним качеством.

Запоминающим устройствам на магнитных сердечниках мини-ЭВМ свойственны характеристики среднего или более низкого качества, однако следует отметить, что интенсивности исследований (см. рис. 11.2) относятся к устройствам емкостью 1 Мбит (128 Кбайт), а мини-ЭВМ обычно используют ЗУ меньшей емкости, чем соответствующие системы базовой конфигурации. Однако ЗУ мини-ЭВМ, как правило, построены из легко заменяемых модулей и обладают хорошей ремонтопригодностью, что свидетельствует об относительно низком их качестве, даже если принять во внимание данные по системам, работающим в средних окружающих условиях.

На рис. 11.2 представлена также зависимость интенсивности исследований для полупроводниковых ЗУ, причем отдельные наиболее слабые разработки так же плохи, как и наихудшие устройства памяти на магнитных сердечниках. Однако из рис. 11.2 видно, что характеристики лучших образцов полупроводниковых ЗУ

Рис. 11.2. Интенсивности исследований и время цикла обращения к памяти для оперативных ЗУ емкостью 1 Мбит (или 128 Кбайт). Эффект введения схем исправления ошибок состоит в том, что большинство исследований проводится в периоды профилактического обслуживания:

- 1 – лучшие ЗУ на магнитных сердечниках;
 2 – худшие ЗУ;
 3 – лучшие полупроводниковые ЗУ



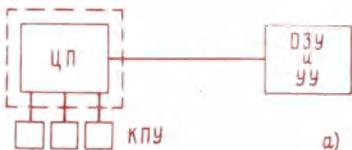
несколько выигрывают по сравнению с характеристиками лучших ЗУ на магнитных сердечниках. Поскольку технология производства устройств памяти быстро развивается, видимо, следует ожидать дальнейшего улучшения полупроводниковых устройств.

Приведенные графики соответствуют ЗУ, не содержащим схем исправления ошибок; введение таких схем приводит к значительному сокращению числа исследований в рабочие часы (см. гл. 9). Интенсивность событий в ЗУ с исправлением ошибок будет исследована в этой главе.

Надежность и архитектура системы

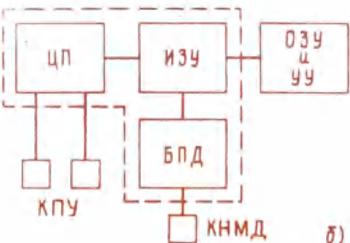
Данные, приведенные на рис. 11.1 для центральных процессоров, в действительности учитывают также неисправности, возникающие вне процессора при выполнении некоторых операций ввода-вывода. В отдельных случаях выполнение этих операций возложено именно на процессор, однако если они выполняются специальными устройствами, то, чтобы избежать сравнения разнородных характеристик, данные по безотказности процессоров должны быть получены с учетом надежности указанных устройств. Иногда для быстрого восстановления работоспособности системы некоторые из этих устройств дублируются, в таких случаях необходимо определять безотказность каждого устройства в отдельности. Запоминающие устройства, данные по безотказности которых представлены на рис. 11.2, содержат основные схемы управления и выборки адреса, иногда часть схем управления входит в состав процессора.

Из рис. 11.3 видна зависимость потенциальной безотказности процессора от сложности его структуры. Пунктиром показан процессор, характеристики которого отражены на рис. 11.1. Буквами *A*, *B* и *C* в клетках таблиц, представленных на рис. 11.3, отмечены различные варианты процессоров одного и того же класса. На рис. 11.3,а представлена простейшая структура, в которой все операции ввода-вывода выполняются процессором. В этом случае к центральному процессору и запоминающему устройству полностью применимы зависимости, приведенные выше (см. рис. 11.1 и рис. 11.2). На рис. 11.3 приведены также данные о примерном числе ИМС, входящих в состав отдельных устройств, что позволяет оценить их потенциальную безотказность. Отметим, кроме того, что относительное число компонентов контроллеров быстрых периферийных устройств весьма велико во всех изображенных структурах, и поэтому надежность этих контроллеров при вычислении безотказности пренебрегать нельзя.



а)

Устройство	Мини-системы	Малые базовые конфигурации
ЦП	100–1000	500–500
КМПУ	30–100	100–300
Контроллер	80–200	500–1000
НМД или НМЛ		
УУ ОЗУ	70–500	500–1000



б)

Устройство	Мини-системы	Малые базовые конфигурации	Средние базовые конфигурации
ЦП	1100	A 3500 B 500	8000
ИЗУ	400	A 1000 B в составе УУ ОЗУ	В составе БПД
БПД	400	A 350 B 200	2000
КМПУ	70	A 500 B 200	500
Контроллер НМД или НМЛ	160	A 1500 B 1000	5000 (НМД) 1000 (НМЛ)
УУ ОЗУ	500	A 500 B 550	1500

Рис. 11.3. Различные виды архитектуры систем:

а – операции ввода-вывода возложены на процессор; б – операции ввода-вывода даются через мультиплексор периферийных устройств; КПУ – контроллеры блоков прямого доступа; КНМД – контроллер накопителей на магнитных дисках; периферийных устройств

Во второй структуре (рис. 11.3, б) при выполнении некоторых операций ввода-вывода используется метод прямого доступа к памяти, остальные операции ввода-вывода ведутся по-прежнему непосредственно процессором. В этом случае для организации прямого доступа к памяти и интерфейса ЗУ, несущего функции арбитра при обращениях к памяти, необходима дополнительная логика. В такой структуре на долю центрального процессора приходится от 60 до 80% аппаратуры.

На рис. 11.3, в изображена третья, в настоящее время наиболее распространенная структура, в которой кроме интерфейса ЗУ имеется более сложное устройство управления вводом-выводом для передачи всех данных непосредственно в ЗУ. Устройство управления может содержать либо разделенные быстрые каналы и более медленные мультиплексные каналы, либо большой процессор ввода-вывода. В этом случае центральный процессор составляет от 30 до 75% всей логики.

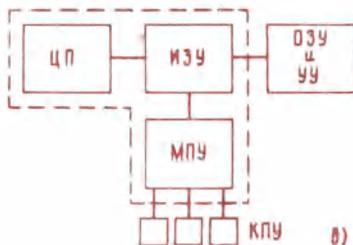
В общем случае, базируясь на данных о числе ИМС, приведенных на рис. 11.3, когда отдельный интерфейс ЗУ или мультиплексоры периферийных устройств могут быть выделены как часть главного обрабатывающего устройства, можно считать, что для оценки их безотказности по характеристикам, отраженным на рис. 11.1, учитываются следующие поправочные коэффициенты:

Основная структура 0,1

Более сложная структура 0,2

Самая сложная структура 0,3

Если мультиплексоры периферийных устройств разделяются на быстрые и мед-



Устройство	Мини-системы	Средние базовые конфигурации	Большие базовые конфигурации
ЦП	A 400 B 1200	A 4500 B 5000 C 15000	A 15000 B 20000
ИЗУ	A 150 B 550	A 900 B 5000	A 3000 B 10000
МПУ	A в составе ИЗУ Быстрый канал Медленный канал	A 500 B 5000	A 5500
КМПУ	A 40 B 70	A 100–500 B 500–1000 C 5500 (мультиплексор)	A 200–1000 B 500–1000 + 3000 B 500–1000
Контроллер НМД или НМЛ	A 150 B 150	A 500–1000 B 1000–5000 C 5500	A 6500 (НМД) 1000 (НМЛ)
УУ ОЗУ	A 180 B 300	A 2000 B 2500 C 1500	A 1500 B 3000

вложены на процессор, имеется блок прямого доступа; *в* – операции ввода-вывода периферийных устройств; *ИЗУ* – интерфейс запоминающего устройства; *БПД* – *МПУ* – мультиплексор периферийных устройств; *КМПУ* – контроллер медленных

ленные каналы, то можно считать, что для них указанные коэффициенты лежат в диапазоне от 0,1 до 0,3, причем при вычислении безотказности (см. рис. 11.1) предполагается, что в системе не более двух каналов.

Что касается микропроцессорных систем, то наибольшее число компонентов для одного из 16-разрядных вариантов систем составляет примерно 50% числа компонентов наименьшей мини-ЭВМ, представленной на рис. 11.3,*а*. Другие микропроцессорные системы состоят, естественно, из гораздо меньшего числа ИМС, причем в настоящее время существует и быстро развивается тенденция, которая должна привести к построению такого рода систем на одной ИМС.

Контроллеры периферийных устройств

В больших и средних вычислительных системах базовой конфигурации согласно рис. 11.3 отношение числа ИМС, составляющих контроллеры НМД, к их числу в центральном процессоре изменяется от 0,2 до 0,3, а аналогичное отношение для контроллеров НМЛ примерно равно 0,1. Наиболее сложным контроллерам в основном свойственны следующие показатели надежности (число исследований на 1000 ч) :

- Контроллеры накопителей на магнитных дисках 0,15–1,4
- Контроллеры накопителей на магнитных лентах 0,1–1,0
- Мультиплексоры связи и периферийные процессоры 0,08–1,0

По сложности контроллеры весьма разнообразны в зависимости от своих возможностей и быстродействия периферийных устройств, и все же различие значений их безотказности не столь велико, как для процессоров: одной из причин может быть то, что контроллерами снабжаются лишь средние и большие процессоры, так что большие значения безотказности соответствуют любым первым моделям процессоров при условии, что в этих случаях имеется больше информации, позволяющей обнаружить недостатки проектирования. Однако, поскольку в системах с большим быстродействием надежность контроллеров, по-видимому, падает (см. гл. 3), попытка повышения качества конструкции последних может привести к повышению средних показателей надежности по сравнению с характеристиками основной массы контроллеров менее быстродействующих систем.

Имея в виду, что средние и большие процессоры в среднем обладают быстродействием около 400 тыс. команд/с, причем безотказность лучших образцов составляет около 0,5 исследований на 1000 ч, можно предполагать, что безотказность контроллеров относительно безотказности центрального процессора определяется следующими коэффициентами:

Основная структура	0,1
Более сложная структура	0,2
Самая сложная структура	0,3

Отношение числа компонентов контроллеров НМД и НМЛ к их числу в процессорах в малых вычислительных системах базовой конфигурации составляет от 0,2 до 1,4. Большие значения соответствуют случаю, когда контроллер предназначен для управления устройствами, которыми обычно обеспечиваются более мощные системы. Подобное отношение для мини-ЭВМ заключено в пределах от 0,1 до 0,8, из чего становится ясно, что иногда контроллеры могут быть так же сложны, как и процессор. В этих случаях для отражения зависимости относительной безотказности от сложности можно ввести дополнительные коэффициенты.

В многих случаях каждое медленное периферийное устройство снабжается отдельным контроллером, при этом надежность последнего можно не учитывать при расчетах, поскольку она значительно выше надежности самих устройств. Иногда в дополнение к главному мультиплексору системы в систему вводится мультиплексор медленных периферийных устройств, безотказность которого обычно сравнима с безотказностью других довольно сложных контроллеров.

Примеры значений относительной безотказности

Следующие примеры показывают, что приведенные выше соотношения выполняются на практике.

1. Средняя системы с быстродействием 400 тыс. команд/с:

Тип устройства	Число исследователей на 1000 ч	Отношение числа исследований на 1000 ч к их числу по процессору в целом	Отношение числа ИМС к общему их числу в процессоре в целом
ЦП	0,25	0,36	0,57
Интерфейс ЗУ	0,08	0,11	0,14
Мультиплексор периферийных устройств	0,37	0,53	0,27
Процессор в целом (ЦП, интерфейс ЗУ и мультиплексор периферийных устройств)	0,70	1,00	1,00
Контроллер периферийного устройства (НМД среднего объема, НМЛ, мультиплексор медленного устройства)	0,31	0,44	0,22

При быстродействии 400 тыс. команд/с безотказность процессора в целом довольно высока (0,7 исследований на 1000 ч), однако она несколько понижена из-за относительно низкого качества мультиплексора периферийных устройств, безотказность которого, если исходить из числа составляющих его интегральных микросхем, должна равняться примерно 0,13 исследования на 1000 ч при его качестве, эквивалентном качеству центрального процессора. Аналогично безотказность контроллеров периферийных устройств также могла бы быть выше.

2. Средняя система с быстродействием 270 тыс. команд/с:

Тип устройства	Число исследований на 1000 ч	Отношение числа исследований на 1000 ч к числу в процессоре в целом	Отношение числа ИМС к их числу в процессоре в целом
Процессор в целом (центральный процессор, интерфейс ЗУ и мультиплексор периферийных устройств)	3,34	1,0	1,0
Контроллер НМД	1,15	0,34	0,5
Контроллер НМЛ	0,24	0,07	0,1
Процессор связи	0,69	0,21	0,6

В этой системе процессор в целом обладает низким качеством (согласно рис. 11.1 лучшим образцам с тем же быстродействием соответствует 0,4 исследования на 1000 ч). Контроллеры периферийных устройств и процессор связи также, видимо, не столь надежны, как могли бы быть. Если определять их безотказность с учетом относительного числа составляющих их интегральных микросхем, то она могла бы достигнуть соответственно 0,2; 0,4 и 0,24 исследования на 1000 ч.

Приведенные примеры показывают, что у каждого производителя вычислительной техники могут возникать свои трудности, и сомнительно, чтобы все оборудование, устанавливаемое одним поставщиком, обладало одинаковыми качеством и ремонтопригодностью.

Время исследований

Среднее время одного исследования центральных процессоров, характеристики которых приведены на рис. 11.1, укладывается в следующие пределы:

Процессоры средних и больших базовых конфигураций, ч	0,5 – 5,3
Процессоры малых базовых конфигураций, ч	1,9 – 5,2
Минипроцессоры, ч	2,1 – 4,4

В приведенных показателях не учтено время ожидания инженеров по ремонту при обслуживании по вызову. В гл. 7 показано, что обычно среднее время исследования процессора составляет примерно 2 ч. Если это время меньше 2 ч, значит ремонтопригодность процессора низка и большинство исследований имеет настолько короткую длительность, что невозможно собрать точную информацию об отказах. Среднее время исследования, меньше 1,5 ч, зарегистрировано на рис. 11.1 только для семейств процессоров, близких к наихудшим, а аналогичный показатель для процессоров, имеющих к тому же низкую ремонтопригодность, составляет примерно 1 ч. В указанных случаях низкая ремонтопригодность компенсируется главным образом активным применением функционального модульного принципа (см. гл. 9) и на ожидание резерва тратится малое время.

Значительное превышение 2-часовой нормы времени исследования происходит в основном из-за увеличения времени простоя (8 ч и более), которое определяется временем ожидания резерва, затратами на процедуры обслуживания и квалифи-

кацией инженеров-ремонтников. Уровень квалификации инженеров-ремонтников связан с требованиями, предъявляемыми к конкретной системе: при обслуживании наиболее надежных процессоров инженеры имеют мало возможностей для тренировки своего мастерства, и, видимо, поэтому время простоя велико.

Можно полагать, что среднее время исследований зависит от распределения времени простоя, и эта зависимость выражается следующим образом:

<i>Распределение времени простоя</i>	<i>Среднее время исследования, ч</i>	<i>время ожидания</i>
Весьма удовлетворительное	1,0	
Удовлетворительное	2,5	+ иженеров-ремон-
Неудовлетворительное	5,0	ников

Если обслуживание микропроцессоров ведется инженерами, присутствующими на месте функционирования системы, то среднее время исследования имеет тот же порядок. В некоторых случаях систему необходимо отправить на ремонтную станцию, что приводит к прерыванию работы системы на 1 день и более.

Время исследования периферийных устройств имеет те же пределы, что и для процессоров. Среднее время исследования ЗУ обычно 1–3 ч, поскольку для наименее надежных блоков запасные части обычно имеются в наличии. Однако если ЗУ допускает реконфигурацию с тем, чтобы система продолжала функционирование вместе с вышедшей из строя частью памяти, то в какой-то момент может оказаться, что запасные части достать не слишком просто, и такое устройство может все же обладать неудовлетворительным распределением времени простоя.

События и время простоя с точки зрения пользователя

Число событий на исследование сильно зависит от того, что готов допустить пользователь, и, как указывалось в гл. 7, меняется в различных системах от 1 до 4. В качестве практической характеристики современной системы можно принять, что число событий на исследование равно 2. Поэтому можно считать, что среднее время исследования на событие имеет следующий разброс:

<i>Распределение времени простоя</i>	<i>Среднее время исследования на событие, ч</i>	<i>время ожидания</i>
Весьма удовлетворительное	0,5	
Удовлетворительное	1,25	+
Неудовлетворительное	2,5	2

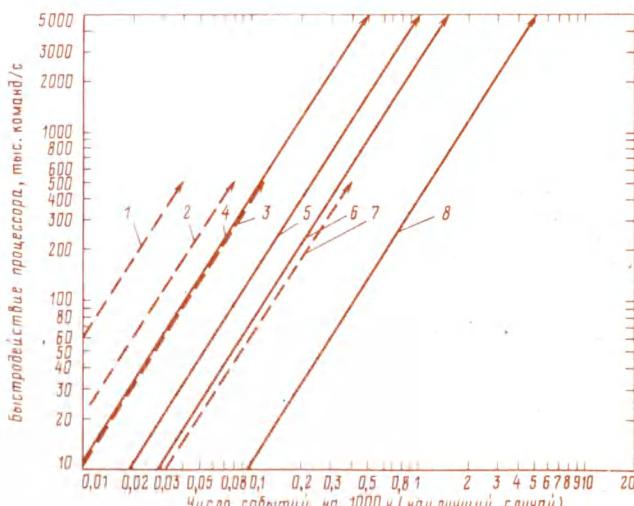


Рис. 11.4.

Подрисуночная подпись к рис. 11.4.

Поправочные коэффициенты

Окружающие условия		Ремонтопригодность	Загруженность		
Хорошие условия	1	Хорошая ремонтопригодность	1	Очень низкая загруженность	0,25
Средние условия	2	Средняя ремонтопригодность	2	Низкая загруженность	0,5
Плохие условия	4	Плохая ремонтопригодность	4	Средняя загруженность	1,0
				Высокая загруженность	2,0

Коэффициент качества (в зависимости от числа рабочих лет)

Качество	Ранние отказы за первые 6 лет						Ошибки конструирования за первые 3 года (только для новой продукции)		
	1	2	3	4	5	6	Среднее	1	2 и 3
Высокое	1,5	1	1	1	1	1	1	2	Зависят от процедур поставщика (см. текст)
Среднее	4,5	2,5	1,5	1	1	1	2	2,5	
Низкое	10	7	5	4	3	2	5	3	

Время простоя и время ожидания

Распределение времени простоя	Среднее время простоя на событие, ч	П р и м е ч а н и е . При обслуживании по вызову добавить к среднему времени простоя на событие время реакции . Возмож-
Весьма удовлетворительное Удовлетворительное Неудовлетворительное	0,5 1,25 2,5	+ время восстановления, время обработки программ на неисправной машине и т.д.

Рис. 11.4. Предсказание безотказности процессоров (ОЗУ) и контроллеров периферийных устройств и факторы, влияющие на надежность:

МПУ/ПВВ/БПД – мультиплексор периферийных устройств, или процессор ввода-вывода, или блок прямого доступа; **ИЗУ** – интерфейс оперативного запоминающего устройства; **КБПУ** – контроллер быстрых периферийных устройств; 1 – МПУ/ПВВ/БПД, ИЗУ и КБПУ микро- и мини-систем (основная структура); 2 – то же (более сложная структура); 5 – то же (более сложная структура); 6 – то же (сложная структура); 7 – процессор микро- и мини-систем (включая МПУ/ПВВ/БПД и ИЗУ); 8 – процессор базовой конфигурации (включая МПУ/ПВВ/БПД и ИЗУ)

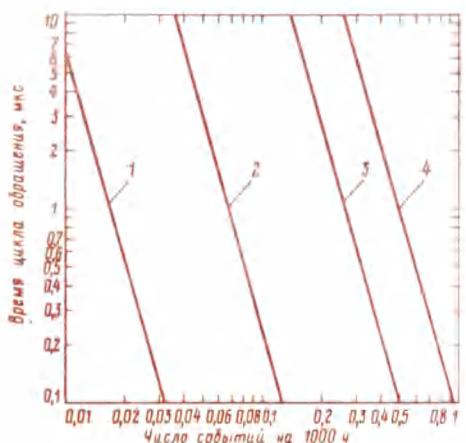


Рис. 11.5. Предсказание безотказности ЗУ (в состав входят основные узлы управления и источники питания) емкостью 1 Мбит (128 Кбайт). Факторы, влияющие на надежность, перечислены на рис. 11.4:

1 – лучшие полупроводниковые ЗУ с исправлением ошибок;
2 – лучшие ЗУ на магнитных сердечниках с исправлением ошибок;
3 – лучшие полупроводниковые ЗУ;
4 – лучшие ЗУ на магнитных сердечниках

Кроме указанного времени простоя необходимо учесть время восстановления, время работы при необнаруженной неисправности и т.д. (см. гл. 7). Если же время ожидания инженерного обслуживания увеличивается, то следует предположить, что возможно увеличение числа событий на исследование еще на 2 события, однако для таких событий к среднему времени исследования следует добавить только время восстановления и т. д.

На рис. 11.4 подведен итог нашим рассуждениям о практическом методе предсказания безотказности основного электронного оборудования. Здесь отражены такие характеристики систем, как наименьшее число событий на 1000 ч и быстродействие (в тысячах команд в секунду) для процессоров, мультиплексоров периферийного оборудования, интерфейсов ЗУ и контроллеров высокоскоростных периферийных устройств в предположении, что на одно исследование приходятся 2 события. Для упрощения дальнейших ссылок поправочные коэффициенты, необходимые для вычисления безотказности, и ожидаемое среднее время простоя сведены в таблицу на рис. 11.4.

Подобным образом, на рис. 11.5 приведены данные о наименьшем числе событий на 1000 ч и времени цикла обращения к оперативному ЗУ системы, причем соответствующие поправочные коэффициенты следует выбирать из рис. 11.4. Однако, как указывалось выше, поправочные коэффициенты, отражающие влияние ремонтопригодности, заключены в диапазоне значений 1–2. На рис. 11.5 приведены данные также для ЗУ, имеющих средства исправления ошибок.

ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА

Анализ неисправностей периферийных устройств более сложен, чем исследование неисправностей процессора, поскольку при их регистрации не придерживаются определенного стандарта. Из-за того что информация о большинстве неисправностей периферийных устройств достаточно больших систем выводится в журнал ошибок, пользователям нет необходимости сообщать о каждом событии. Инженеры-ремонтники, как правило, заполняют ярлык отказа при выполнении процедур обслуживания, однако вовсе не обязательно отмечают время, в течение которого устройство ожидало обслуживания или доставки запчастей.

Накопители на сменных магнитных дисках

В табл. 11.1 приведены статистические данные о надежности НМД различных типов и объемов. В 3-й и 4-й графах зафиксированы данные об активности инженеров-ремонтников, откуда видно, что разброс значений среднего времени исследования

Таблица 11.1. Надежность НМД

Характеристика устройства (емкость и скорость передачи данных)	№ устройства	Число исследований на 1000 ч	Среднее время исследования, ч	Среднее время включения вре-мя ожидания, ч	Число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на событие, ч
1	2	3	4	5	6	7
8 Мбайт 150 Кбайт/с	1	0,4	1,6			
	2				1,12	3,6
	3				0,53	8,4
30 – 60 Мбайт 300 Кбайт/с	1	0,4	3,9		0,23	10,0
	2	0,55	3,1		0,48	8,9
	3	0,41		7,9		
	4	0,7	2,0			
	5	0,62		7,8		
	6	0,45	3,8			
100 – 200 Мбайт 800 Кбайт/с	1				0,86	8,3
	2	0,46		7,5		
	3	0,53				
	4	0,33		8,0	0,77E	

П р и м е ч а н и е. Е – получено из журнала ошибок.

рассматриваемых устройств и процессоров примерно одинаков. В графе 5, дополняющей 3 и 4-ю, представлены данные об активности инженеров с точки зрения пользователя: учет времени ожидания повышает среднее время простоя до 7–8 ч. В последних двух графах указаны данные для тех случаев, когда предполагалось, что пользователь регистрирует каждое событие (исключение составляет одно значение, отмеченное буквой Е, полученное в результате анализа журнала ошибок). Совершенно ясно, что регистрируются вовсе не все события, информация о многих из них утрачена подобно тому, как теряется информация о неудачных загрузках или о неправильной работе системы (см. гл. 6), когда запись может быть сделана лишь после возникновения нескольких событий. В таблице приводятся данные для устройств с различным объемом и скоростью передачи данных, причем их надежность практически одинакова. Накопители на магнитных дисках, обладающие наилучшими характеристиками надежности, работают в системах со значительным числом таких устройств, так что средняя загруженность меньше обычной. Можно считать, что наилучшим образом, эксплуатируемым при средней загруженности, свойственны следующие показатели надежности: 0,4 исследования на 1000 ч; 1,2 события на 1000 ч (по всем событиям).

Факторы, влияющие на надежность

Можно считать, что поправочные коэффициенты, отражающие влияние качества, ремонтопригодности и окружающих условий, рассмотренные ранее, применимы и на этот раз, однако обычно значения первых двух коэффициентов соответствуют высоким и средним уровням указанных факторов. Установлено, что различный уровень надежности НМД (отношение показателей надежности этих устройств в разных системах меняется от 1 до 8) является следствием различной загруженности устройств, а приведенные ранее коэффициенты загруженности главным образом получены по периферийным устройствам.

Во многих случаях один и тот же НМД используется с пакетами дисков разного объема, а запись информации на треках производится с различной плотностью, причем при более высокой плотности записи безотказность несколько снижается (в основном за счет обнаружения ошибок передачи данных, см. гл. 6), так что естествен-

но ввести следующие поправочные коэффициенты для учета отношения объем/быстродействие:

<i>Отношение объем/быстродействие</i>	<i>Поправочный ко- эффициент</i>
Мало	0,7
Среднее	1,0
Велико	1,5

Среднее время исследования (без учета времени ожидания) имеет следующие значения:

<i>Распределение времени простоя</i>	<i>Среднее время исследования, ч</i>	
	<i>на исследование</i>	<i>на событие</i>
Весьма удовлетворительное	1,5	0,5
Удовлетворительное	3,0	1,0

Основная часть накопителей на магнитных дисках (см. табл. 11.1) поддерживается в исправном состоянии за счет обслуживания, проводимого в основную рабочую смену инженерами, присутствующими на месте функционирования системы, и для некоторых из них время простоя отражает только время, фактически затраченное на ремонт при обслуживании. Распределение времени простоя с учетом времени ожидания аналогично наихудшим ситуациям, представленным в табл. 7.2, за исключением тех из них, когда при длительности свыше 8 ч имеют место несколько случаев 50–100-часового простоя и, возможно, один 250-часовой простой. Можно ожидать, что накопителям на магнитных дисках свойственны приведенные ниже показатели среднего времени ожидания, причем, естественно, по любым стандартам сумма времен исследования и ожидания приводит к неудовлетворительному распределению времени простоя:

<i>Распределение времени простоя</i>	<i>Среднее время ожидания, ч</i>	
	<i>На исследование</i>	<i>На событие</i>
Ожидание резерва	4,0	1,33
Ожидание инженеров по ремонту	Среднее время реак- ции на вызов	Среднее время реакции 3

Накопители на магнитных дисках мини-систем обладают примерно той же безотказностью, которая указана в табл. 11.1, хотя большинство этих устройств имеет меньшую емкость, более низкую скорость обработки данных и меньшую загруженность. В отдельных случаях накопители на магнитных дисках, предназначенные для базовых конфигураций, работают в мини-системах с такой же безотказностью, но чаще они обладают низкими качеством и безотказностью.

Накопители на магнитных лентах

В табл. 11.2 содержатся характеристики надежности накопителей на магнитных лентах различных лет выпуска. Хотя разброс значений интенсивности исследований в табл. 11.2 больше, чем в табл. 11.1, однако характеристики лучших моделей более современных типов накопителей на магнитных лентах и дисках почти совпадают. Можно считать, что наилучшими показателями безотказности при средней загруженности являются следующие (как и для всех других периферийных устройств предполагается 3 события на одно исследование): 0,7 исследования на 1000 ч; 2,1 событий на 1000 ч.

Таблица 11.2. Надежность накопителей на магнитных лентах

Характеристики	№ устройства	Число исследований на 1000, ч	Среднее время исследования, ч	Среднее время исследования, включая время ожидания, ч	Число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на события, ч
30–60 Кбайт/с, до 32 бит/мм, инвертированная запись без возвращения к нулю	1	0,49			1,37	3,5
	2				0,71	7,6
	3	0,8	2,1		1,7	5,6
	4				8,0	0,8
	5				3,8	2,5
	6	0,75				
80–160 Кбайт/с, 64 бит/мм, фазо-кодированная запись	1	0,7	2,8		0,93	3,1
	2	1,5	1,9		2,8	5,8
	3		1,2	6,6		
	4				34,0	1,1
	5	0,83	1,5			
	6	1,2		8,8		
80–320 Кбайт/с, 64 бит/мм, фазо-кодированная запись	1				2,1	5,2
	2				3,0	6,9
	3	0,6		7,4	{ 0,96 5,7E }	3,2

П р и м е ч а н и е. Е – получено из журнала ошибок.

При учете событий, возникающих в НМЛ игнорируются события неверной загрузки, свойственные новым моделям с самозагрузкой. Такие события легкопередолимы, однако их учет может ухудшить приведенное значение интенсивности событий в 2 раза и более. Значения среднего времени исследования НМЛ примерно совпадают с аналогичными показателями указанными в предыдущем параграфе, хотя следует заметить, что в основном среднее значение ближе к 1,5 ч. Подобным образом почти одинаково время ожидания для НМЛ и НМД. Надежность тоже сильно зависит от их загруженности, и, как становится ясно из табл. 11.2, при обслуживании некоторых из них из-за низкого качества и слабой ремонтопригодности возникают трудности, еще более усиливающиеся при изменении характеристик окружающей среды, о которых говорилось в гл. 4.

Надежность НМЛ мини-систем в общем случае несколько выше по сравнению с надежностью подобных устройств систем базовой конфигурации, однако загруженность и скорость их функционирования обычно очень низки.

Краткие выводы

Остальные периферийные устройства обладают характеристиками, подобными характеристикам накопителей на магнитных лентах и дисках, однако в одних случаях уровень их загруженности очень низок, а в других – время исследования может быть несколько меньше, так что безотказность кажется значительно более высокой. В табл. 11.3 приведены наилучшие характеристики надежности наиболее распространенных периферийных устройств, пересчитанные для среднего уровня загруженности и средней скорости функционирования. Кроме того, для удобства в таблице также перечислены факторы, влияющие на надежность, и соответствующие поправочные коэффициенты. Разброс значений времени простоя указан для чистого времени исследования и времени исследования с учетом времени ожидания резерва, причем, вероятнее всего, последний показатель относится к случаям, когда в наличии имеется запасное периферийное устройство. Для определения фактического среднего времени простоя при событии также необходимо добавить время функционирования при необнаруженной неисправности, время восстановления и часть времени реакции на вызов при ожидании начала обслуживания.

Таблица 11.3. Предсказание надежности периферийного оборудования. Отражены и события на 1000 ч и соответствующие им времена исследования и ожидания. Пред при средней загруженности и средней скорости передачи данных. Звездочкой отмечено так как обычно уровень загруженности ниже (а иногда значительно ниже) среднего

Характеристики устройств, емкость и скорость передачи данных	Число исследований на 1000 ч	Среднее время исследования, ч
Накопители на сменных магнитных дисках, 100 Мбайт, 800 Кбайт/с	0,4	1,5 – 3,0
НМЛ 160 Кбайт/с, фазокодированная запись	0,7	1,5 – 3,0
Накопители на постоянных магнитных дисках или барабаны, менее 10 Мбайт, более 1 Мбайт/с	0,47	2,0 – 4,0
Устройства считывания с перфокарт, 1000 перфокарт/мин	1,7*	1,5 – 3,0
Устройства вывода на перфокарты, 100 перфокарт/мин	2,0*	2,0 – 4,0
Печатающие устройства, 1000 строк/мин	1,8	1,3 – 3,0
Устройства ввода с перфоленты, 1000 символов/мин	1,2*	1,3 – 2,0
Устройства вывода на перфоленту, 100 символов/мин	1,9*	1,3 – 2,0
Печатающая машинка	1,3*	1,0 – 2,0
Символьные дисплеи	0,2	1,0 – 2,0

Поправочные

Окружающие условия		Ремонтопригодность	
Хорошие	1	Хорошая	1
Средние	2	Средняя	2
Плохие	4	Плохая	4

Коэффициенты качества

Качество	Ранние неисправности в зависимости от числа рабочих лет (2000 ч)						Проектные ошибки (только для новых выпусков) в зависимости от числа рабочих лет		
	1	2	3	4	5	6	Среднее	1	2
Высокое	1,5	1	1	1	1	1	1	2	Зависит от конкретных процессов поставщиков (см. текст)
Среднее	4,5	2,5	1,5	1	1	1	2	2,5	
Низкое	10	7	5	4	3	2	5	3	

П р и м е ч а н и е. Среднее время простоя на событие следует определять с учетом времени восстановления и времени обработки программ на неисправной машине.

При обслуживании по вызову добавить $\frac{\text{Время реакции}}{3}$. Возможен учет дополнительных событий, для которых следует брать только время восстановления и время обработки программ на неисправной машине.

лучшие характеристики исследований
полагается, что устройства функционируют
ны показатели, которые на практике лучше приведенных,

Среднее время исследования, включая время ожидания резер- ва, ч	Число собы- тий на 1000 ч	Среднее время исследования на событие, ч	Среднее время исследования на событие, включая время ожидания резерва (см. также примечание), ч	
			Диапазон	Среднее значение
5,5 – 7,0	1,2	0,5 – 1,0	1,83 – 2,33	2,08
5,5 – 7,0	2,1	0,5 – 1,0	1,83 – 2,33	2,08
6,0 – 8,0	1,4	0,67 – 1,33	2,0 – 2,67	2,33
5,5 – 7,0	5,1*	0,5 – 1,0	1,83 – 2,33	2,08
6,0 – 8,0	6,0*	0,67 – 1,33	2,0 – 2,67	2,33
5,3 – 7,0	5,4	0,43 – 1,0	1,77 – 2,33	2,05
5,3 – 6,0	3,6*	0,43 – 0,67	1,77 – 2,33	2,05
5,3 – 6,0	5,7*	0,43 – 0,67	1,77 – 2,0	1,89
5,0 – 6,0	3,9*	0,33 – 0,67	1,67 – 2,0	1,84
5,0 – 6,0	0,6	0,33 – 0,67	1,67 – 2,0	1,84
<i>коэффициенты</i>				
Загруженность		Отношение быстродействие/емкость		
Очень низкая	0,25	Мало	0,7	
Низкая	0,5	Среднее	1,0	
Средняя	1,0	Большое	1,5	
Высокая	2,0			

Примеры предсказания надежности

П р и м е р. 1. *Определение необходимости в кондиционировании воздуха для мини-системы.* Рассмотрим основную конфигурацию мини-системы с запоминающим устройством на магнитных сердечниках объемом 32 Кбайт, в состав системы входят пищущая машинка и устройство ввода с перфоленты (см. рис. 11.4, 11.5 и табл. 11.3). Надежность системы определяется по табл. 11.4. Предполагается, что система поставлена на обслуживание по вызову, и, поскольку она не обеспечена резервными устройствами, общее среднее время ожидания обслуживания возрастает дополнительно на 4 ч на исследование или на 1,33 – 2 ч на событие в зависимости от типа устройства.

Будем считать, что возможны различные условия окружающей среды, и введем соответствующие поправочные коэффициенты:

Хорошие условия (полное кондиционирование воздуха)	1
Средние условия (кондиционер отсутствует, система выключается в жаркую с точки зрения пользователей погоду или при достижении пределов, оговоренных в документации системы (см. гл. 4))	2
Плохие условия (кондиционер отсутствует, система функционирует в сильно запыленном помещении при чрезмерно высоких температуре и влажности)	4

Таблица 11.4. Предсказание надежности мини-системы для определения необходимости в кондиционировании воздуха

Устройство	Число событий на 1000 ч	Поправочные коэффициенты					Полное число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на событие, ч	Время простоя на 1000 ч
		Качество	Ремонто-пригодность	Загруженность	Быстродействие				
Центральный процессор . (300 тыс. операций/с)	0,28	2	1	1	—	0,56	1,25+2,0	1,82	
ЗУ (32 Кбайт, 1 мкс)	0,12	2	1	1	—	0,24	1,25+2,0	0,78	
Пищущая машинка	3,9	2	1	0,25	0,7	1,37	1,84+1,33	4,34	
Устройство считывания с перфоленты (300 символов/с)	3,6	2	1	0,25	0,7	1,26	1,89+1,33	4,06	
Система в целом						3,43	3,21	11,0	

Результирующая безотказность и коэффициент обслуживаемости имеют следующие значения:

Состояние окружающей среды	Число событий на 1000 ч	Коэффициент обслуживаемости
Хорошие условия	3,43	0,989
Средние условия	6,86	0,978
Плохие условия	13,72	0,956

Таблица 11.5. Сравнительные характеристики мини-системы и малой системы базо окружавших условиях

Устройство	Число событий на 1000 ч	Поправочные	
		Качество	Ремонто-пригодность
Мини-процессор (300 тыс. операций/с)	0,28	2	1
ЗУ (64 Кбайт, 1 мкс)	0,24	2	1
Пищущая машинка	3,9	2	1
Низкоскоростной НМД	1,2	2	1
Низкоскоростной НМЛ	2,1	2	1
Низкоскоростное устройство ввода с перфокарт	5,1	2	1
Низкоскоростное печатающее устройство	5,4	2	1
Мини-система в целом			
Центральный процессор малой системы (1000 операций/с)	0,42	1	2
ЗУ (96 Кбайт, 2 мкс)	0,3	1	1
Пищущая машинка	3,9	2	1
Среднескоростной НМД	1,2	1	1
Среднескоростной НМЛ	2,1	1	1
Низкоскоростное устройство ввода с перфокарт	5,1	1	1
Низкоскоростное печатающее устройство	5,4	1	1
Малая система в целом			

В этом случае, вероятно, можно было бы допустить возникновение 6,86 событий на 1000 ч и смириться с коэффициентом, обратным коэффициенту обслуживаемости, равным 2,2 %, и поэтому кондиционирование воздуха совершенно не обязательно. Правда, следует определить простой из-за выключения системы в слишком жаркую погоду (см. гл. 4), поскольку они могут не удовлетворять пользователя по каким-либо другим соображениям.

Пример 2. Сравнение мини-системы и малой базовой конфигурации. В табл. 11.5 приведены сравнительные характеристики мини-системы и малой базовой конфигурации. Различия в качестве и уровне ремонтопригодности взяты из практики, однако предполагается, что обеим системам свойственны одинаковые распределения времени простоя и время реакции на вызов инженера по ремонту. Из таблицы ясно, что малая система может обладать большей надежностью, чем мини-система, причем коэффициенты, обратные коэффициентам обслуживаемости систем, имеют следующие значения:

Мини-система . . . 3,1 %

Малая система . . . 2,1 %

Любой из этих коэффициентов, вероятно, мог бы быть приемлем, хотя при менее благоприятных окружающих условиях ни один из них не будет удовлетворять пользователя.

Снижение безотказности систем связано главным образом с наличием периферийных устройств (для которых принято считать, что возникает 3 события на исследование или около 1,5 исследований на отказ, в нашем примере возможно возникновение 1,4 – 2,1 отказа на 1000 ч или 3 – 4 отказа на рабочий год).

Пример 3. Надежность микропроцессора. Микропроцессор с эквивалентным быстродействием 100 тыс.команд/с (см. приложение 3), обладающий запоминающим устройством емкостью 8 Кбайт (время цикла обращения к памяти 1 мкс), среднего качества, с хорошей ремонтопригодностью и низкой загруженностью, функционирует в хороших окружающих условиях (т.е. в хороших для систем с малой рассеиваемой мощностью).

Если безотказность центрального процессора равна 0,14 события на 1000 ч, а безотказность запоминающего устройства – 0,49·8/128 событиям на 1000 ч, то безотказность микропроцессора в целом равна $(0,14 + 0,49 \cdot 8/128) \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,171$ события на 1000 ч.

вой конфигурации, функционирующих в хороших

коэффициенты		Полное число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на событие, ч	Среднее время простоя на 1000 ч
Загруженность	Скорость			
1	–	0,56	3,25	1,82
1	–	0,48	3,25	1,56
0,25	0,7	1,37	3,17	4,34
0,5	0,7	0,84	2,08 + 1,33	2,86
0,25	0,7	0,74	2,08 + 1,33	2,52
0,25	0,7	1,78	2,08 + 1,33	6,07
0,5	0,7	3,78	2,05 + 1,33	12,78
		9,55	3,35	31,95
1	–	0,84	3,25	2,37
1	–	0,30	3,25	0,97
0,25	0,7	1,37	3,17	4,34
0,5	1	0,6	3,41	2,05
0,25	1	0,53	3,41	1,81
0,25	0,7	0,89	3,41	3,03
0,5	0,7	1,89	3,38	6,39
		6,42	3,32	21,32

Считая, что возможно возникновение 2 событий на исследование или 3 события на отказ, получаем 0,057 отказа на 1000 ч.

Если процессор функционирует 40 ч в неделю, или 2000 ч в год, то его безотказность равна 0,114 отказа в год, или 1 отказ за 9 лет. При этих вычислениях не учитывалась безотказность периферийного оборудования, наличие которого могло бы привести к значительно более частым отказам в зависимости от качества, ремонтоопригодности и других его свойств.

Приведенные примеры дают возможность понять, как можно оценивать надежность простых систем, однако при оценках надежности более сложных конфигураций с резервными устройствами требуются более подробные вычисления: один из методов оценки безотказности и коэффициента обслуживаемости сложных систем приводится в гл. 12.

Предсказание надежности программного обеспечения

Поставщики вычислительной техники обычно отказываются давать какие-либо оценки надежности программного обеспечения и по числу ошибок, с которыми, возможно, столкнется пользователь и по возможному их влиянию на функционирование всей системы. Такая позиция совершенно естественна, поскольку невозможно предвидеть и заранее удовлетворить все требования пользователя или дать гарантии, что не существует ошибок, приводящих к отказу всей системы. Кроме того, те же производители часто готовы оценивать надежность оборудования, обычно игнорируя многочисленные сложности, о которых уже говорилось в нашей книге, и, сталкиваясь с ошибками проектирования, знают, какие усовершенствования следует разработать и внести в конструкцию с тем, чтобы обеспечить практическое достижение предсказанной надежности. Что касается программного обеспечения, большинство ошибок в котором считается ошибками проектирования, то пользователи, встречающиеся с отказами относительно высокого уровня, обычно получают соответствующую помощь, а те, кто в подобных случаях выражает свое недовольство особенно сильно, имеют даже больше. В конце концов все-таки достигается приемлемый уровень надежности.

Основная причина, по которой производители вычислительной техники отказываются оценивать надежность программного обеспечения, состоит в том, что, как указывалось в гл. 5, в начале своей жизни оно может обладать слишком низким качеством, быть очень чувствительным к изменениям загруженности и являться предметом частого усовершенствования, направленного на то, чтобы через довольно длительное время надежность достигла приемлемого уровня. Несмотря на тенденцию, популярную в настоящее время среди производителей, утверждать, что вновь разработанное программное обеспечение по своему качеству превосходит известное ранее, производителям следовало бы прийти к взаимопониманию с пользователями в отношении приемлемого уровня и улучшения надежности, чтобы пользователи по крайней мере могли соответственно планировать свою работу или в лучшем случае производителей нельзя было бы обвинить в искасжении оценок. С учетом этих замечаний ниже приводятся оценки надежности программного обеспечения, причем они даны хотя и не для всего разнообразия ошибок, зависящих от того, как с точки зрения пользователя будет вестись себя программное обеспечение, но дают возможность относительно легко предсказывать надежность системы в целом.

Начальный уровень надежности только что созданного программного обеспечения меняется в зависимости от качества этапа разработки, качества гарантийных процедур, объема и сложности составных частей, а также от квалификации создателей и от того, является ли оборудование, для которого предназначено программное обеспечение, уже испытаным в работе или оно также вновь создано.

Интенсивность совершенствования программного обеспечения зависит от степени предусмотренной (встроенной) ремонтопригодности, качества поддержки, числа установленных систем, частоты выпуска новых версий и объема переписанных программ.

Разброс надежности одного и того же программного обеспечения от установки к установке велик вследствие различной степени загруженности, а также из-за разли-

чия в быстродействии процессоров и сложности конфигурации. Интенсивность повышения надежности, по-видимому, зависит от частоты и разнообразия изменений работы пользователя и конфигураций систем. Кроме того, каждый пользователь должен быть готов к повышенному числу отказов при работе с новой версией программного обеспечения, обусловленному наличием ранних неисправностей (ошибок).

В табл. 11.6 перечислены различные типы систем управляющего программного обеспечения, используемого в настоящее время в мини-, микро-ЭВМ и вычислительных системах базовой конфигурации, и объемы каждой системы в тысячах команд.

Таблица 11.6. Предсказание надежности управляющего программного обеспечения (по данным, приведенным в гл. 5)

Начальная надежность нового программного обеспечения

Тип управляющего программного обеспечения	Размер процессора	Объем программного обеспечения, тыс. команд	Число системных отказов на 1000 ч
<i>Мини- и микросистемы</i>			
Элементарная управляющая программа	Средний	0,25 – 1	0,4*
Базовая управляющая программа	"	1 – 4	1,5*
Расширенная управляющая программа	"	4 – 16	6*
Базовая операционная система	"	16 – 64	25*
Расширенная операционная система	"	64 – 256	100
<i>Типовые системы базовой конфигурации</i>			
Управляющая программа	Малый	4 – 16	6
Операционная система с малыми возможностями	Малый/средний	16 – 64	25
Операционная система со средними возможностями	Средний	64 – 256	100
Универсальная операционная система (полного объема)	Средний/большой	64 – 256	100

Поправочные коэффициенты

Изменения в зависимости от числа рабочих лет (от поставки первому пользователю)							Rанние ошибки	
	1	2	3	4	5	6	Более 6	В 1-й год для любой конфигурации оборудования, установленного год спустя после выпуска программного обеспечения, коэффициент равен 2
Коэффициент	1	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	

Умножить каждый годовой показатель на следующие коэффициенты

Начальное качество	Ремонтопригодность и частота изменений	Уровень загруженности и пользовательские изменения
Низкое	2	Низкие
Среднее	1	Средние
Довольно высокое	0,5	Довольно высокие
Высокое	0,25	Высокие

П р и м е ч а н и е. Коэффициенты ремонтопригодности и загруженности могут меняться от года к году; звездочкой отмечено, что управляющие программы для программного управления контроллерами периферийных устройств и процессорами связи имеют такие же показатели.

Для каждого класса систем указаны минимальный и максимальный объемы, чтобы отразить средние характеристики конкурирующих систем, обладающих примерно одинаковыми возможностями. В таблице также приведены значения средней интенсивности системных отказов на протяжении 1-го года от момента поставки первым пользователям. Подобные значения интенсивности могли бы быть приняты для систем программного обеспечения различных объемов, поскольку так же, как ранее указывалось при обсуждении безотказности процессоров, более крупные системы могут быть надежнее малых систем с теми же возможностями и характеристиками. В этой же таблице приведены относительные объемы и значения безотказности управляющих программ, входящих в состав программного обеспечения по управлению контроллерами периферийных устройств и процессорами связи.

Кроме того, в табл. 11.6 приведены поправочные коэффициенты, которые, как и средние значения интенсивности отказов, получены по данным, представленным в гл. 5. Первый коэффициент учитывает изменение числа возникающих отказов со временем в течение жизни программного продукта и свидетельствует, что в среднем на год безотказность уменьшается в 100 раз. По-видимому, в очень немногих системах встречается указанная самая высокая интенсивность отказов, большинство же систем спустя год после выпуска новой версии программного продукта обладает удовлетворительным качеством, однако можно ожидать, что при поставке программного обеспечения для каждой новой конфигурации аппаратуры системы в течение первого года работы будут вскрываться новые, не замеченные ранее ошибки, так что для более поздних версий поставляемых программных продуктов коэффициент выявления ранних ошибок принят равным двум: например, большая операционная система может иметь следующие характеристики (рассматриваются две версии системы – самый первый выпуск и выпуск в начале второго года) :

Система	Среднее число системных отказов на 1000 ч в зависимости от числа рабочих лет						
	1	2	3	4	5	6	Более 6
Первый выпуск системы	400	80	40	20	12	8	4
Система, выпущенная в начале второго года		160	40	20	12	8	4

Следующий коэффициент в табл. 11.6 отражает начальное качество программного обеспечения, причем большинство достаточно крупных операционных систем, выпущенных за последние несколько лет, принадлежат к одной из первых трех категорий. Оставшиеся два коэффициента позволяют учесть изменения (о них говорилось выше), которые вносят поставщики и пользователи соответственно. В обоих случаях следовало бы считать, что значения коэффициентов будут изменяться с течением времени в соответствии с переделками, произведенными за конкретный год: например для операционной системы или пакета прикладных программ, разработанных для конкретного пользователя, коэффициенты для учета годовых изменений можно принять равными 1 в 1-й год жизни и 0,25 – во 2-й и следующие годы при условии, что исходный проект не меняет своей сути при выпуске новых версий. Каждый из этих коэффициентов отражает среднегодовое, а для случая универсального программного обеспечения – кратковременное изменение качества, обусловленное выпуском новых версий или ожидаемым различием в загруженности, причем значение этого изменения согласуется с данными, приведенными в гл. 5.

Пример предсказания безотказности программного и аппаратурного обеспечения

Рассмотрим две модели вычислительных систем базовой конфигурации первого выпуска, обладающих быстродействием 1200 тыс. команд/с, запоминающим устройством на магнитных сердечниках (емкостью 512 кБайт, циклом обращения к па-

мяти 500 нс) без исправления ошибок, причем предполагается, что обе системы функционируют при средней загруженности в хороших окружающих условиях. Можно считать, что системы будут обладать следующими среднегодовыми характеристиками (вычисления основаны на данных, взятых из рис. 11.4 и 11.5 и табл. 11.6) при 4000 ч работы в год:

Устройства системы	Годы					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
<i>Лучшая система, обладающая высоким качеством и высокой ремонтопригодностью</i>						
Центральный процессор	4	2	2	2	2	2
ЗУ	4,8	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Всего:	8,8	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Программное обеспечение с достаточно высоким начальным качеством и средними другими характеристиками	200	40	20	10	6	4
<i>Худшая система, обладающая низким качеством и низкой ремонтопригодностью</i>						
Центральный процессор	148	36	20	16	16	16
ЗУ с низким качеством и средней ремонтопригодностью	89	92	12	9,6	9,6	9,6
Всего:	237	128	32	25,6	25,6	25,6
Программное обеспечение среднего качества	400	80	40	20	12	8

В первом случае основные трудности при эксплуатации системы в первые 5 лет возникают из-за ненадежности программного обеспечения, а затем становится более низкой безотказность оборудования. Во втором случае в первые 4 года различия в безотказности оборудования и программного обеспечения меньше, после чего большая часть отказов происходит из-за оборудования. Отметим, что последний результат подобен характеристикам, представленным на рис. 2.6 для процессора и рис. 5.6 для программного обеспечения.

Качество работы системы с точки зрения пользователя

После получения пользователем новой вычислительной системы, хотя производитель может быть не готов к обеспечению определенных характеристик системы, оговоренных в контракте, уровни надежности и обслуживаемости должны быть обсуждены с пользователем, чтобы последний мог по меньшей мере установить свои собственные стандарты для принятия решения о том, когда ему следует начать выражать недовольство качеством работы системы. Важнейшими областями, в которых могут устанавливаться такие стандарты, являются следующие:

1. *Системный уровень* – определяются коэффициент обслуживаемости системы и интенсивность отказов системы. В гл. 12 приведен один из методов оценки этих параметров для систем большинства типов.

2. *Комплект программного обеспечения* – задается число особо сложных отказов и время реакции на вызов специалиста для проведения соответствующих исправлений (см. гл. 5).

3. *Отдельные устройства оборудования* – задается уровень готовности, охватывающий частоту вмешательства инженеров-ремонтников, время ремонтного обслужи-

Таблица 11.7. Коэффициенты готовности устройств с учетом профилактического

Устройство	Тип обслуживания	Исследования	
		Число на 1000 ч	Среднее время простоя, ч
НМД	На месте	0,8	6,25
	По вызову	0,9	9,25
НМЛ	На месте	1,4	6,25
	По вызову	1,4	9,25
Устройство ввода с перфокарт (при низкой загруженности)	На месте	1,7	6,25
	По вызову	1,7	9,25
Печатающее устройство	На месте	3,6	6,15
	По вызову	3,6	9,15
Пишущая машинка (при низкой загруженности)	На месте	1,3	5,5
	По вызову	1,3	8,5
Видеодисплей	На месте	0,4	5,5
	По вызову	0,4	8,5

живания, длительность профилактического обслуживания в запланированное время и время реакции инженерных служб.

В табл. 11.7 показано, как можно оценить стандартные значения готовности отдельных устройств. Базовые значения интенсивности исследований и различных временных характеристик взяты из табл. 11.3 в предположении, что устройства обладают средним качеством, хорошей ремонтопригодностью, средней скоростью переработки информации, работают в хороших окружающих условиях при средней или низкой загруженности. Приведенные в таблице времена простоя являются по сути средними временами исследования, включающими время ожидания резерва, а при обслуживании по вызову предполагается, что среднее время реакции равно 3 ч. Периоды профилактического обслуживания взяты из табл. 7.5, но они не могут считаться типичными, поскольку существует слишком много разнообразных моделей устройств, и поэтому этот показатель должен определять производитель. Среднее значение коэффициента готовности вычислено по значениям общего числа исследований, времени ожидания и времени профилактического обслуживания за 1000 ч. И, наконец, самые низкие значения коэффициента готовности определены по 99 %-ным доверительным интервалам для неудовлетворительных распределений времени простоя (см. рис. 8.6) на периодах в 500 и 3000 ч. Эти показатели, естественно, могли бы быть еще ниже на коротких периодах или при более низком качестве оборудования, однако при высоком качестве оборудования и лучшем обслуживании они могли бы стать значительно выше.

ГЛАВА 12

ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ И ОБСЛУЖИВАЕМОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ УСТРОЙСТВ

Параллельное соединение устройств

При вычислении безотказности и обслуживаемости систем с резервированием часто используются следующие обозначения и соотношения:

- m – наработка на событие отдельного устройства;
- d – среднее время простоя на событие;

обслуживания

Время простоя на 1000 ч	Время профилактического обслуживания на 1000 ч	Коэффициент готовности, %		
		Средний	Наихудший случай	
			500 ч, 1 мес	3000 ч, 6 мес
5.0	1.2	99,4	92	97
7,4	1,2	99,1	90	96
8,8	4,1	98,7	88	95
13,0	4,1	98,3	87	95
10,6	8,0	98,1	87	94
15,7	8,0	97,6	86	93
22,1	17,3	96,1	82	91
32,0	17,3	95,0	79	89
7,2	1,0	99,2	91	97
11,1	1,0	98,8	89	96
2,2	0,3	99,7	94	98
3,4	0,3	99,6	93	98

$s = m/(m+d)$ – коэффициент обслуживаемости отдельного устройства;
 $u = d/(m+d)$ – обратный коэффициенту обслуживаемости отдельного устройства;
 $M = (m^2 + 2md)/2d \approx m^2/2d$ – наработка на событие для системы с дублированием;
 $D = d/2$ – среднее время простоя на событие для системы с дублированием;
 $S = \frac{(m^2 + 2md)/(2d)}{(m^2 + 2md)/2d + d/2} = \frac{m^2 + 2md}{(m+d)^2} = \frac{(m+d)^2 - d^2}{(m+d)^2} = 1 - u^2$ – коэффициент обслуживаемости системы с дублированием.

Подобным образом вычисляется

$U = u^2$ – коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости системы с дублированием.

Для систем с троированием

$M \approx m^3/(3d^3)$ – наработка на событие;
 $D = d/3$ – среднее время простоя на событие;
 $S = 1 - u^3$ – коэффициент обслуживаемости;
 $U = u^3$ – коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости

Основная трудность при вычислениях состоит в том, что приведенные формулы неприемлемы для случаев, когда требуется сохранение работоспособности, например, двух устройств из трех. Для вычислений в таких случаях следует использовать биномиальное распределение

$$(s+u)^n,$$

где n – число устройств, s – рассматривается как вероятность того, что устройство работоспособно; u – как вероятность того, что устройство неработоспособно.

При биномиальном распределении вероятность сохранения работоспособного состояния точно y устройствами из n устройств равна

$$\frac{n!}{y!(n-y)!} s^y u^{n-y}.$$

Например, в составе системы содержится три НМЛ, два из которых обязательно должны сохранять работоспособность, причем предполагаемые коэффициенты обслуживаемости устройств одинаковы и равны 0,9876. Вероятности сохранения работоспособности некоторыми устройствами приведены ниже:

<i>y</i>	Вероятность сохранения работоспособности
3	0,96326
2	0,03628
1	0,00046
0	0,00000

Вероятность сохранения работоспособности не менее чем двумя устройствами равна 0,99954.

В приложении 2 приведены подробности программы вычисления коэффициентов обслуживаемости параллельного соединения устройств, предназначенные для использования на программируемом калькуляторе.

Последовательное соединение устройств

Если для нормальной работы необходимы все устройства из некоторой совокупности, то их можно считать соединенными последовательно, и полная вероятность сохранения работоспособности равна произведению коэффициентов обслуживаемости отдельных устройств. Например, можно полагать, что некоторая система с центральным процессором обладает характеристиками, указанными на рис. 12.1.



Рис. 12.1. Коэффициент обслуживаемости при последовательном соединении.

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ПО – программное обеспечение

Для оценки полной интенсивности отказов можно учесть число событий на 1000 ч, поэтому при вычислении коэффициента обслуживаемости лучше пользоваться формулой, содержащей указанную величину, а не наработку на отказ:

$$\text{Коэффициент обслуживаемости} = \left(\frac{d - ik}{1000} + 1 \right)^{-1};$$

$$\text{Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости} = \left(\frac{1000}{d - ik} + 1 \right)^{-1},$$

где ik – число событий на 1000 ч и d – среднее время простоя на событие.

При другом методе определения коэффициента обслуживаемости системы в приведенную формулу подставляются подсчитанные значения полного числа событий на 1000 ч и среднего времени простоя на событие. Для рассмотренного примера (см. рис. 12.1) коэффициент обслуживаемости получается равным 0,9685230, а не 0,9682174, как раньше. При вычислениях, проводимых в обычном диапазоне, расхождение не превышает ошибок оценки безотказности устройств, однако рассмотренный метод для последовательного соединения приводит к наиболее точным результатам.

Коэффициент восстановления

Важнейшие коэффициенты, рассматриваемые при определении конфигурации системы, отражают возникновение отказов; хотя конфигурация системы обычно выбирается так, чтобы коэффициент обслуживаемости был как можно выше, при возникновении отказа могут потребоваться некоторые действия по восстановлению системы, во время выполнения которых ни одно из устройств непригодно для нормальной работы. Коэффициент восстановления зачастую более важен, чем время, потерянное вследствие низкой обслуживаемости всех устройств.

Продолжительность и сложность восстановления зависят от типа отказа и функций, выполняемых различными устройствами при конкретном применении. Например, пусть рассмотренное выше параллельное соединение ЗУ на магнитных лентах может попеременно использоваться для записи и считывания: при этом типы отказов и времена восстановления для 10 событий приведены ниже:

Тип отказа	Действие оператора, мин	Восстановление устройства, мин	Общие затраты времени, мин	Число событий	Полное время восстановления, мин
Потеря управляемости	2	1	3	4	12
Отказ по считыванию	2	4	6	3	18
Отказ по записи	2	8	10	3	30
Итого.				10	60

Среднее время восстановления на событие равно 6 мин.

Коэффициент восстановления, представляющий собой вероятность отсутствия действий по восстановлению работоспособного состояния, можно вычислить, если известны наработка на событие или число событий на 1000 ч и среднее время восстановления. Для рассмотренного выше

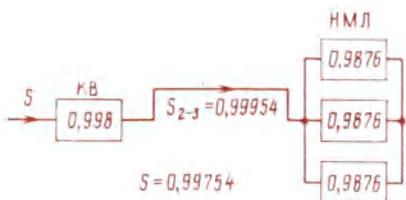


Рис. 12.2. Коэффициент обслуживаемости при последовательном соединении:
KB – коэффициент восстановления

параллельного соединения ЗУ при наработке на событие, равной 100 ч, коэффициент восстановления каждого устройства равен

$$\frac{100}{100 + 0,1} = \left(\frac{10 \cdot 0,1}{1000} + 1 \right)^{-1} = 0,999.$$

Коэффициенты восстановления всех одновременно используемых устройств можно представить в виде последовательной цепочки. Например, для конфигурации с двумя функционирующими НМЛ полный коэффициент восстановления равен $0,999 \cdot 0,998 = 0,998$. Чтобы определить полный коэффициент обслуживаемости системы, представляющей собой вероятность того, что система функционирует и никаких процедур восстановления не проводится, можно умножить полный коэффициент восстановления на коэффициент обслуживаемости системы. Отсюда следует, что параллельное соединение трех накопителей на магнитных лентах имеет вид, представленный на рис. 12.2. Поэтому полный коэффициент обслуживаемости равен $0,99954 \cdot 0,998 = 0,99754$, т.е. значительно снижен, что особенно хорошо заметно, если рассматривать отношение коэффициентов, обратных коэффициентам обслуживаемости, равное примерно пяти:

Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости параллельного соединения	0,00046
Тот же коэффициент с учетом коэффициента восстановления	0,00246

Отметим, что при расчете коэффициентов обслуживаемости параллельного соединения устройств коэффициенты обслуживаемости отдельных устройств определяются исходя из времени простоя при событиях без учета времени восстановления (см. рис. 11.4 для электронного оборудования и табл. 11.3 для периферийных устройств). Для последовательного соединения в коэффициенте обслуживаемости отдельных устройств может быть учтено время восстановления, однако часто лучше рассматривать их по отдельности, поскольку предсказание надежности таким методом помогает разработать оптимальные процедуры восстановления.

Сложные соединения

Многие системы можно представить в виде последовательных или параллельных соединений их составных частей. Однако существуют системы, составные части которых связаны более сложным образом. На рис. 12.3, а приведен пример одного из таких сложных соединений. На рис. 12.3, б изображено почти эквивалентное его представление, не отражающее лишь случай функционирования конфигурации, в которой одно устройство U1

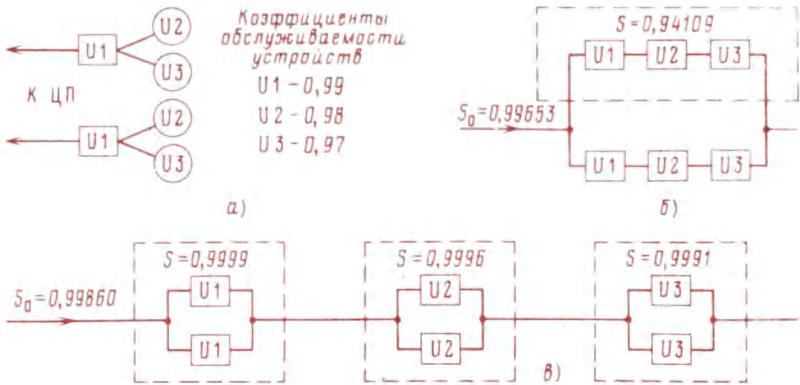


Рис. 12.3 Вычисление коэффициентов обслуживаемости сложного соединения:

а – сложное соединение устройств. Для правильного функционирования необходимо хотя бы одно исправное устройство каждого типа; *б* – простейшая модель; *в* – эквивалентная модель; S_0 – полный коэффициент обслуживаемости

соединено с U_2 , а второе устройство U_1 с U_3 . Все возможные случаи взаимного соединения U_1 , U_2 и U_3 отражает рис. 12.3, *в*. Истинное значение полного коэффициента обслуживаемости исходной системы равно 0,99771 и является промежуточным между соответствующими коэффициентами, вычисленными для моделей, приведенных на рис. 12.3, *б* и *в*. Части системы, которые невозможно представить в виде их параллельного или последовательного соединения, можно представлять сложными моделями (см. рис. 12.3, *в*), если эти части не оказывают решающего влияния на работу всей системы, то истинный коэффициент обслуживаемости можно вычислять по указанной модели. В противном случае для учета всех возможных работоспособных состояний системы требуется более подробный анализ.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБСЛУЖИВАЕМОСТИ СИСТЕМЫ В ЦЕЛОМ

При расчетах коэффициента обслуживаемости системы в целом может показаться, что безотказность и восстанавливаемость системы высоки, поэтому полезно научиться видеть, является ли этот результат типичным для рассматриваемой системы. На рис. 12.4 показаны коэффициенты, обратные коэффициентам обслуживаемости (в процентах) ряда созданных систем базовой конфигурации и мини-систем (точнее говоря, указанные коэффициенты для минимальных конфигураций отдельных систем, причем во внимание не принималось время работы в неисправном состоянии). Некоторые из них составляют крупные семейства, другие представлены одним или двумя экземплярами в течение долгого времени. Коэффициент обслуживаемости меньших систем, который мог бы быть значительно выше, понижается из-за недостатка резервного периферийного оборудования и иногда из-за большого времени ожидания при обслуживании по вызову.

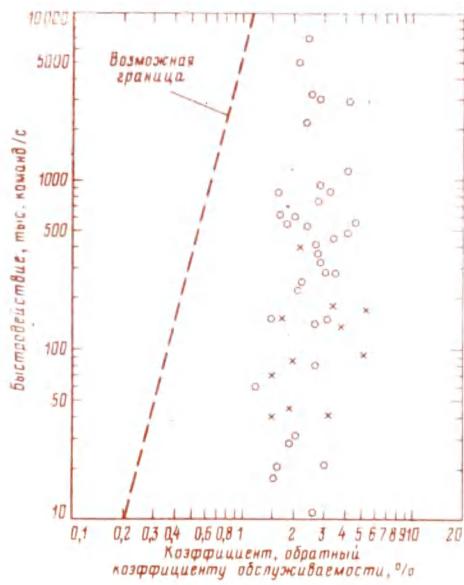


Рис. 12.4. Коэффициенты, обратные коэффициентам обслуживаемости вычислительных систем общего назначения (с одним процессором при минимальной конфигурации, время обработки программ на неисправной машине не учитывается).

○ – базовые конфигурации;
× – мини-ЭВМ

Системы средних размеров

Рассмотрим очень простую конфигурацию системы средних размеров, изображенную на рис. 12.5, и приведем для нее процедуру вычислений коэффициентов обслуживаемости. Все используемые величины получены из соответствующих данных, указанных в гл. 11, и являются средними для оборудования или взяты спустя 4–5 лет после первой реализации программного обеспечения. Предполагается, что окружающая среда достаточно хорошо и система обслуживается техническим персоналом, находящимся непосредственно на месте ее функционирования. В этом случае при вычислении коэффициентов обслуживаемости принимается во внимание лишь время восстановления системы и не учитывается время обработки отдельных программ при неисправной системе.

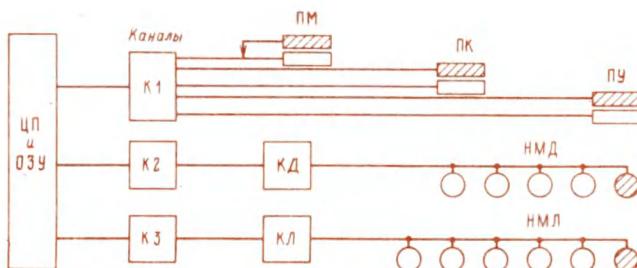


Рис. 12.5. Простая конфигурация вычислительной системы средних размеров:

K_1, K_2, K_3 – каналы; K_D – контроллер накопителей на магнитных дисках; K_L – контроллер накопителей на магнитных лентах. Резервные периферийные устройства заштрихованы

Процессор, запоминающее устройство, каналы и контроллеры периферийных устройств. Характеристики: 400 тыс. команд/с, запоминающее устройство на магнитных сердечниках емкостью 4 Мбит с циклом обращения 1 мкс, высокий уровень ремонтопригодности, средние показатели по загруженности, качеству и распределению времени простоя. Из рис. 11.4 определяем следующие показатели для процессора:

Число событий на 1000 ч	1 · 2 = 2
Среднее время простоя на событие	1,25 ч

Рассматриваемый процессор включает в себя каналы K_1 и K_2 , поэтому, полагая, что канал связи с НМД сложен по своему устройству, а канал связи с НМЛ прост, принимаем, что число событий на 1000 ч равно 1,2; 0,6 и 0,2 для центрального процессора и указанных каналов соответственно. Кроме того, предполагается, что дополнительный канал и контроллер НМЛ просты, а контроллер НМД довольно сложен. Из табл. 11.5 находим показатель безотказности для запоминающего устройства: $0,49 \cdot 4 \cdot 2 = 3,92$ события на 1000 ч. Коэффициенты обслуживаемости каждого устройства приведены ниже:

Тип устройства	Число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на событие	Коэффициент обслуживаемости
Центральный процессор	1,2	1,25	0,99850
Канал 1	0,2	1,25	0,99975
Канал 2	0,6	1,25	0,99925
Канал 3	0,2	1,25	0,99975
Контроллер НМД	0,4	1,25	0,99950
Контроллер НМЛ	0,2	1,25	0,99975
Запоминающее устройство	3,92	1,25	0,99512

Программное обеспечение. Характеристики: операционная система с полным набором возможностей среднего качества, со средним уровнем ремонтопригодности, функционирующая при среднем уровне загруженности. Безотказность в середине 5-го года после выпуска оценивается по табл. 11.6:

$$400 \cdot 0,04 = 16 \text{ событий на 1000 ч.}$$

После устранения отказов операционная система должна быть перезагружена, однако иногда могут быть утрачены каталог файлов или очереди, что приводит к увеличению времени простоя. Приведем пример для 100 событий:

Событие	Число событий	Время восстановления, ч	Общее время восстановления, ч
Обычные аварийные остановы	90	0,3	27
Потеря каталога файлов или другие сложные аварии	10	2,3	23
Итого.	100		50

Среднее время восстановления программного обеспечения	0,5 ч
Безотказность	16 событий на 1000 ч
Среднее время простоя на событие	0,5 ч
Коэффициент обслуживаемости	0,99206

Коэффициент восстановления для процессора и запоминающего устройства. Если предполагать, что к потере каталогов файлов приводит та же часть отказов процессора, которая указана в примере для программного обеспечения, то среднее время восстановления будет равно 0,5 ч. Предполагается также, что при возникновении любых отказов в запоминающем устройстве процессор прекращает функционировать, и обычно при этом время восстановления равно 0,3 ч, однако потеря файлов, являющаяся следствием только 2 % возникающих событий, увеличивает среднее время восстановления до 0,34 ч. Поэтому коэффициенты восстановления и полные коэффициенты обслуживаемости устройств имеют следующие значения:

Тип устройства	Число событий на 1000 ч	Среднее время восстановления, ч	Коэффициент восстановления	Коэффициент обслуживаемости устройства	Полный коэффициент обслуживаемости
Центральный процессор .	1,2	0,5	0,99940	0,99850	0,99790
Запоминающее устройство	3,92	0,34	0,99867	0,99512	0,99380
	<u>5,12</u>		<u>0,88807</u>	<u>0,99363</u>	<u>0,99171</u>

Коэффициент восстановления для каналов. Предполагается, что отказы каналов также приводят к прекращению функционирования системы с временем восстановления 0,3 ч. Отказы в канале связи с НМД могут привести к нарушению целостности каталогов при операциях записи на диск и считывания с него, но этот факт здесь игнорируется.

№ канала	Число событий на 1000 ч	Среднее время восстановления, ч	Коэффициент восстановления	Коэффициент обслуживаемости устройства	Полный коэффициент обслуживаемости
1	0,2	0,3	0,99994	0,99975	0,00069
2	0,6	0,3	0,99982	0,99925	0,99907
3	0,2	0,3	0,99994	0,99975	0,99969
	<u>1,0</u>		<u>0,99970</u>	<u>0,99875</u>	<u>0,99845</u>

Коэффициенты восстановления для контроллеров периферийных устройств. Здесь предполагается, что программное обеспечение обладает достаточной гибкостью, чтобы допустить пересоединение контроллеров после возникновения события. Однако, из-за того что половина событий является предметом инженерных исследований, требующих использования

системы в специальном режиме с последующей перезагрузкой программного обеспечения, среднее время восстановления равно 0,15 ч.

Тип устройства	Число событий на 1000 ч	Среднее время восстановления, ч	Коэффициент восстановления	Коэффициент обслуживаемости устройства	Полный коэффициент обслуживаемости
Контроллер НМД	0,4	0,15	0,99994	0,99950	0,99944
Контроллер НМЛ	0,2	0,15	0,99997	0,99975	0,99972
Всего:	0,6		0,99991		0,99916
Системные отказы	0,3				

Базовая конфигурация и программное обеспечение в целом. Ниже приведены значения интенсивности событий, коэффициенты восстановления и обслуживаемости для аппаратуры базовой конфигурации и программного обеспечения как единого целого:

Тип устройства и программное обеспечение	Число событий на 1000 ч	Число отказов системы на 1000 ч	Коэффициент восстановления	Полный коэффициент обслуживаемости
Программное обеспечение	16	16	0,99206	0,99206
ЦП и ЗУ	5,12	5,12	0,99807	0,99171
Каналы	1,0	1,0	0,99970	0,99845
Всего:	22,12	22,12	0,98985	0,98231

Периферийное оборудование. Характеристики: средняя скорость переработки информации, высокая ремонтопригодность; НМД, НМЛ и печатающие устройства работают при среднем уровне загруженности, устройства ввода с перфокарт и пишущие машинки – при низком уровне загруженности; НМЛ и пишущие машинки обладают средним, а остальные устройства – хорошим качеством. Безотказность и время простоя взяты из табл. 11.3 (предполагается наихудшее значение времени простоя). Для коэффициента обслуживаемости имеем

Тип устройства	Число событий на 1000 ч	Среднее время простоя на событие, ч	Коэффициент обслуживаемости устройства
НМД	$1,2 \cdot 1 \cdot 1 = 1,2$	2,33	0,99721
НМЛ	$2,1 \cdot 1 \cdot 2 = 4,2$	2,33	0,99031'
Печатающие устройства	$5,4 \cdot 1 \cdot 1 = 5,4$	2,33	0,98757
Устройства ввода с перфокарт	$5,1 \cdot 0,5 \cdot 1 = 2,55$	2,33	0,99409
Пишущие машинки	$3,9 \cdot 0,5 \cdot 2 = 3,9$	2,0	0,99226

Ниже указаны общая безотказность и общий коэффициент обслуживаемости:

Тип устройства	Общее число устройств	Необходимое число устройств	Общее число событий на 1000 ч	Общий коэффициент обслуживаемости
НМД	5	4	4,8	0,99992
НМЛ	6	5	21,0	0,99863
Печатающие устройства	2	1	5,4	0,99985
Устройства ввода с перфокарт	2	1	2,55	0,99997
Пишущие машинки	2	1	3,9	0,99994
Всего			37,65	0,99831

Коэффициенты восстановления для периферийных устройств. Для рассматриваемой системы предполагается, что испытательные программы можно использовать при проверке периферийных устройств одновременно с работой пользователя, в противном случае примерно для каждого третьего события время исследования длительностью от 1 до 3 ч (см. табл. 11.3) следовало бы учесть в коэффициенте восстановления для последовательного соединения устройств в предположении, что обслуживание по контракту проводится лишь в рабочее время. Однако часть этих исследований можно было бы отложить до наступления периода профилактического обслуживания, и все же, поскольку устройства бездействовали бы в течение более длительного периода, среднее время простоя на событие возросло бы. Кроме того, при использовании испытательных программ одновременно с работой пользователей нет необходимости перезаписывать операционную систему для диагностических целей, что является положительным явлением, потому что перезапись эквивалентна отказу системы.

1. *Накопители на магнитных дисках.* Поскольку время функционирования с необнаруженной неисправностью не принимается во внимание, коэффициент восстановления очень сильно зависит от решаемых прикладных задач и от того, как распределены между отдельными устройствами системное программное обеспечение, очереди и каталоги. Если предположить, что при работе пользователя используется множество различных независимых файлов, которые могут быть восстановлены по отдельности без большой задержки функционирования всей системы в целом, то коэффициентом восстановления можно пренебречь. На системных накопителях обычно существует некоторое число резервных треков для файлов пользователя, так что иногда время восстановления увеличивается незначительно. Однако всякий раз, когда происходят ошибки при считывании программного обеспечения, или возникает прерывание автономного режима функционирования устройства, или пакет дисков необходимо переставить на другой дисковый механизм, вероятно появление отказа системы, и кроме затрат времени на перезагрузку программного обеспечения появляются другие задержки. Если считать, что в системе функционируют два системных диска, причем 60 % возникающих событий приводят к отказу системы, то:

$$\text{Число отказов системы на 1000 ч} \dots \dots \dots \dots \quad 2 \cdot 1,2 \cdot 0,6 = 1,44$$

$$\text{Среднее время простоя на событие, ч} \dots \dots \dots \dots \quad 0,3 + 0,25 = 0,55$$

Коэффициент восстановления 0,99921
 Полный коэффициент обслуживаемости $0,99921 \cdot 0,99992 = 0,99913$

2. Пищущие машинки. Они являются устройствами управления системы, и их неисправности иногда могут привести к отказу системы. Кроме того, они могут использоваться для проведения диагностических операций. Иногда требуется отсоединить неисправную машинку и подключить резервную. Полагая, что к отказам системы приводят 25 % событий и для исследования машинки требуется 1 ч, вычислим полное число системных отказов и коэффициент восстановления:

Число отказов системы на 1000 ч $0,25 \cdot 3,9 = 0,975$
 Среднее время простоя на события, ч $0,3 + 1,0 = 1,3$
 Коэффициент восстановления 0,99873
 Полный коэффициент обслуживаемости $0,99873 \cdot 0,99994 = 0,99867$

3. Другие периферийные устройства. Именно для рассматриваемой системы предполагается, что события в печатающих устройствах, устройствах ввода перфокарт и НМЛ не приводят к отказам системы, к фактическим задержкам функционирования всей системы в целом или к необходимости

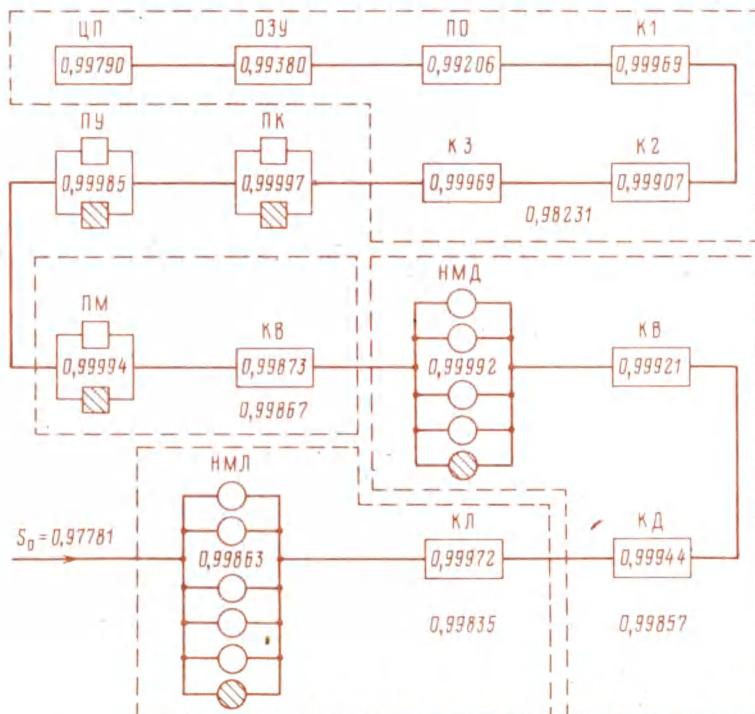


Рис. 12.6. Эквивалентная модель для расчета коэффициента обслуживаемости системы, изображенной на рис. 12.5:

S_0 – полный коэффициент обслуживаемости. Резервные периферийные устройства заштрихованы; КВ – коэффициент восстановления

ти перезаписи программного обеспечения для диагностических целей, так что вычислять коэффициенты восстановления указанного оборудования нет необходимости.

Периферийное оборудование и система в целом. Представление системы в целом в виде последовательных и параллельных соединений ее частей приведено на рис. 12.6, а результаты соответствующих вычислений указаны в табл. 12.1. Согласно рис. 12.4 значение полного коэффициента, обратного коэффициенту обслуживаемости, равное 2,2 %, приемлемо для системы такого размера, однако оно могло бы быть и выше, если бы проводилось обслуживание системы по вызову, отсутствовал бы полный набор резервных периферийных устройств и испытательные программы, выполняемые одновременно с работой пользователя, обладали бы меньшей эффективностью. Добиться улучшения системы можно путем обеспечения ее оперативным запоминающим устройством со средствами исправления ошибок, в результате коэффициент обслуживаемости возрос бы на 0,5 %.

Таблица 12.1. Вычисление коэффициентов обслуживаемости вычислительной системы средних размеров

Устройство	Число событий на 1000 ч	Число отказов на 1000 ч	Коэффициент восстановления	Полный коэффициент обслуживаемости
Контроллер НМД	0,4	0,2	0,99994	0,99944
НМД	4,8	1,44	0,99921	0,99913
Подсистема НМД	5,2	1,64	0,99915	0,99857
Пишущая машинка	3,9	0,975	0,99873	0,99867
Контроллер НМЛ	0,2	0,1	0,99997	0,99972
НМЛ	21,0	—	—	0,99863
Подсистема НМЛ	21,2	0,1	0,99997	0,99835
Печатающее устройство	5,4	—	—	0,99985
Устройство ввода с перфокарт	2,55	—	—	0,99997
Периферийное оборудование (всего)	38,25	2,715	0,99785	0,99542
Базовая конфигурация (включая каналы)	6,12	6,12	0,99777	0,99017
Программное обеспечение	16,0	16,0	0,99206	0,99206
Система в целом	60,37	24,835	0,98772	0,99781

Обслуживаемость и безотказность на коротких периодах времени

Приведенные на рис. 8.5 и 8.6 характеристики определялись для системы, работающей в течение 2 лет с постоянным повышением надежности. По этим рисункам можно находить коэффициенты обслуживаемости на коротких периодах времени. Если предполагать, что система обслуживает пользователей 250 ч в месяц, то коэффициент обслуживаемости на коротких периодах мог бы быть меньше 94,5 % для 10 % месяцев и меньше 90,1 % для 1 % месяцев.

Подобным образом несложно определить интенсивность отказов системы на коротких периодах (см. гл. 9):

	<i>Число событий на 1000 ч</i>	<i>Число событий на отказ</i>	<i>Число отказов на 1000 ч</i>
Оборудование	8,835	3	2,945
Программное обеспечение	<u>16.0</u>	10	<u>1.6</u>
Итого.	<u>24.835</u>		<u>4,545</u>

Следовательно, полное число событий на отказ примерно равно 5,5, и поскольку ожидается около 6,2 отказа системы или 1,1 отказа на 1 мес, то согласно рис. 9.2 и 9.2 интенсивности отказов системы имеют следующие приближенные значения:

	<i>Число отказов системы на 1 мес</i>	<i>Число отказов системы на 1000 ч</i>
Для 10 % месяцев	≤ 15	≤ 60
Для 1 % месяцев	< 30	< 120

Время обработки программ неисправной системой

В приведенных выше рассуждениях время обработки программ неисправной системой могло бы учитываться при вычислениях различных коэффициентов восстановления, однако, если считать, что этот показатель имеет смысл только по отношению к отказам системы, можно определить коэффициент потерь из-за работы с необнаруженным отказом (и включать его в последовательное соединение при расчетах коэффициента обслуживаемости):

Число отказов системы на 1000 ч 24,835
 Среднее время обработки программ неисправной системой, ч. 0,25
 Коэффициент потерь из-за работы с необнаруженным отказом 0,99383

Тогда полный коэффициент обслуживаемости с учетом времени обработки программ неисправной системой равен $0,99383 \cdot 0,97781 = 0,97178$.

Вычисление коэффициента обслуживаемости методом весовых коэффициентов

В гл. 8 приведен метод весовых коэффициентов для определения коэффициентов обслуживаемости, суть которого состоит в том, что для отражения потерь пропускной способности вследствие отказов вводятся весовые коэффициенты. Например, пусть необходимо одновременно использовать пять НМД (см. рис. 12.5); пропускная способность падает при выходе из строя одного устройства, однако система могла бы продолжать функционирование с ограниченными возможностями при возникновении неисправностей в двух и более накопителях. Введем следующие весовые коэффициенты, на которые следует умножать время простоя при отказе соответствующего числа устройств:

Число устройств, вышедших из строя

Весовые коэффициенты

1	0,2
2	0,5
3	0,8
4	1,0
5	1,0

Оценки коэффициента обслуживаемости с учетом весовых коэффициентов можно выполнить, используя биномиальное распределение (табл. 12.2). Процедура предсказания коэффициента обслуживаемости для минимальной конфигурации, приведенная ранее в этой главе, эквивалентна методу весовых коэффициентов, когда последние принимаются равными 0 и 1, поэтому в табл. 12.2 для пяти НМД проводится сравнение результатов вычислений по обоим методам. Из таблицы ясно, что при использовании метода весовых коэффициентов можно получить значительно более низкие значения коэффициентов обслуживаемости для подсистем с резервными устройствами.

Таблица 12.2. Предсказание коэффициента обслуживаемости с помощью весовых коэффициентов (коэффициент обслуживаемости устройства равен 0,99721)

Число исправ- ных уст- ройств	Число не- исправ- ных уст- ройств	Вероятность	Метод минимальной конфигурации		Метод весовых коэффициентов	
			Весовые коэффициенты	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости	Весовые коэффициенты	Коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости
5	0	0,9861276	—	—	—	—
4	1	0,0137950	0	0	0,2	0,0027590
3	2	0,0000772	1	0,0000772	0,5	0,0000386
2	3	0,0000002	1	0,0000002	0,8	0,0000002
1	4	—	1	—	1,0	—
0	5	—	1	—	1,0	—
Всего:				0,0000774		0,0027978
Полный коэффициент обслуживаемости				0,9999226		0,9972022

П р и м е ч а н и е. В программе, приведенной в приложении 2, вычисляются полные коэффициенты обслуживаемости, а не коэффициенты, обратные коэффициентам обслуживаемости, как в табл. 12.2.

В программе вычисления коэффициента обслуживаемости, приведенной в приложении 2, предусмотрена возможность задания весовых коэффициентов.

Плановое обслуживание

Если система предназначена для непрерывного функционирования, то может потребоваться проведение планового или дополнительного обслуживания. В этом случае вместо коэффициентов обслуживаемости следовало бы рассматривать коэффициенты готовности; однако, поскольку

зачастую процедуры обслуживания такого рода можно сократить или вообще отложить, лучше полагаться на опыт инженеров-ремонтников, наблюдающих за работой системы. В системах новых типов, как указывалось в 1.1 3, 5 и 7, время дополнительного обслуживания, затрачиваемое на усовершенствование оборудования или внесение изменений в программное обеспечение, может стать настолько значительным, что им нельзя будет пренебречь.

МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ

При комплектовании системы резервными процессорами часто предполагается, что коэффициент обслуживаемости станет очень высоким, однако этого может не произойти, если принимать во внимание коэффициенты восстановления. В наихудшем случае, когда одна вычислительная машина выполняет работу пользователя, а другая используется для испытания усовершенствованной версии операционной системы, причем периферийное оборудование может подключаться к обеим системам (по необходимости), полный коэффициент обслуживаемости мог бы вычисляться по модели, изображенной на рис. 12.7 (предполагается, что система состоит из частей, рассмотренных ранее). При определении коэффициента обслуживаемости переключателя периферийного оборудования предполагается, что функционируют пять переключателей со следующими характеристиками: 0,1 события на 1000 ч, среднее время простоя 1 ч, коэффициент обслуживаемости 0,9999.

Полный коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, равен 1,52 %; улучшение, достигнутое по сравнению с однопроцессорной системой, для которой указанный коэффициент равен 2,2 %, не столь значительно, чтобы допустить дополнительные расходы по введению второго процессора. Факторами, не позволяющими еще больше снизить коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, являются, естественно, надежность программного обеспечения и другие действия по восстановлению.

Существует множество иных типов многопроцессорных систем, обладающих по сравнению с предыдущей системой лучшим коэффициентом обслуживаемости. Например, можно использовать совершенно одинако-

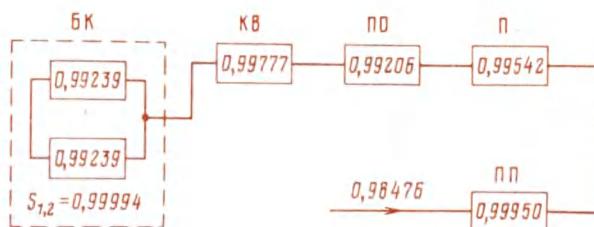


Рис. 12.7. Многопроцессорная система:

БК – базовые конфигурации; $S_{1,2}$ – коэффициент обслуживаемости при исправности одного устройства из двух; *П* – периферийное оборудование; *ПП* – переключатели периферийного оборудования

вые процессоры, работающие по системе "ведущий – ведомый", причем каждый из них обрабатывает программы с помощью собственной операционной системы, однако на "ведущий" процессор возложена задача планирования работ для "ведомого" процессора. В этом случае системные отказы "ведомого" процессора могут не оказывать влияния на функционирование "ведущего", но в случае отказа последнего вся система в целом теряет работоспособность вплоть до завершения процедуры восстановления. Если операционные системы обоих процессоров одинаковы, восстановление может отнять значительно меньше времени, чем в приведенном выше примере. В других системах оба процессора могут иметь одинаковый статус, а некоторая версия операционной системы загружается в тот процессор, который необходим в настоящий момент. В этом случае можно добиться того, чтобы отказы оборудования одного процессора не приводили к полному прекращению функционирования всей системы. Кроме того, можно сделать так, чтобы отдельные типы отказов программного обеспечения не вызывали прерываний работы всей системы, хотя, вероятно, существует множество других отказов с теми же последствиями, о которых говорилось ранее. Еще одной из причин невозможности значительного улучшения качества является наличие оперативного и дополнительных ЗУ, содержащих собственно программное обеспечение, отказы которых практически наверняка ведут к отказам системы, так что добиться более чем 99,9 %-ного теоретического системного коэффициента обслуживаемости весьма сложно.

Системы коммутаций сообщений

Одной из наиболее надежных видов вычислительных систем являются системы, применяемые в области коммутации сообщений для военных целей; обычная конфигурация такой системы приведена на рис. 12.8, а.

Здесь оба процессора получают сообщения, запоминают их одновременно и на магнитной ленте и на магнитном диске, обрабатывают их и создают выходные очереди маршрутов, однако только один процессор передает сообщения по назначению. Эквивалентная модель для расчета обслуживаемости представлена на рис. 12.8, б.

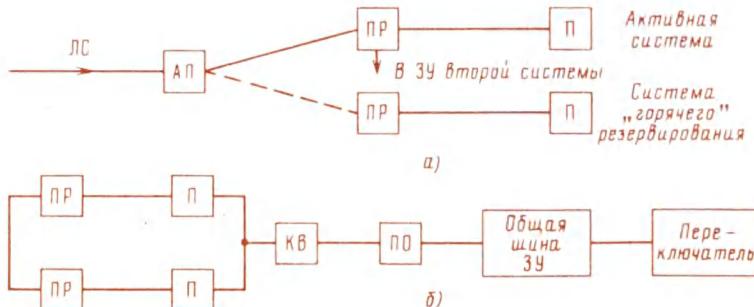


Рис. 12.8. Система коммутации сообщений:

а – конфигурация, б – эквивалентная модель для расчета коэффициента обслуживаемости; ЛС – линии связи; АП – автоматический переключатель; ПР – процессоры

Рассмотренная система обеспечивает очень высокую степень защиты файлов и малую вероятность их потери, хотя при системном отказе могут быть не принятые приходящие сообщения. Для преодоления этих недостатков обычно применяется процедура восстановления, заключающаяся в повторении всеми терминалами передачи их последних сообщений. Поскольку процессоры действуют почти идентичным образом, ошибки программного обеспечения, скорее всего, приводят к прекращению работы обоих процессоров, однако время восстановления должно быть значительно меньше. Устройства переключения и общая шина ЗУ также являются источником риска потери информации, однако обычно они чрезвычайно надежны.

Многопроцессорная мини-система

Существует множество ситуаций, когда пользователь вынужден размышлять о возможности использования многопроцессорных мини-систем вместо системы базовой конфигурации, поэтому полезно сравнить надежность этих систем.

На рис. 12.9, а приведена конфигурация многопроцессорной мини-системы, которую можно было бы применять для тех же целей, что и систему, изображенную на рис. 12.5. На рис. 12.9, б показана приближенная модель мини-системы для расчета обслуживаемости. В состав мини-системы входят три процессора с быстродействием 300 тыс. команд/с и три ЗУ емкостью 2 Мбит, причем для работы необходима исправность двух устройств из трех. Контроллер НМД представляет собой мини-ЭВМ с быстродействием 200 тыс. команд/с и ЗУ емкостью 0,5 Мбит. Предполагается, что система поставлена пользователю спустя 3 года после начала выпуска таких систем и все расчеты проводятся с использованием средних характеристик оборудования, полученных из опыта 2-летней эксплуатации. Каждый процессор имеет собственный системный диск, обработка программ ведется с помощью собственной копии программного обеспечения. Кроме того, предполагается, что для управления многопроцессорной системой должно быть создано новое программное обеспечение, соответствующее конкретной области применения; характеристики надежности программного обеспечения взяты, как для версии, используемой свыше 2 лет, но подвергаемой в этот период очень частым изменениям. И, наконец, считается, что оборудование эксплуатируется в хороших окружающих условиях при средней и слабой загруженности, обладает высокой ремонтопригодностью, средним качеством и не более чем средней скоростью обработки информации; электронному оборудованию свойственно удовлетворительное распределение времени простоя, а периферийным устройствам — более выгодное значение времени простоя, причем обслуживание системы ведется инженерами, присутствующими на месте ее функционирования.

Результаты вычисления частоты возникновения событий, отказов системы и коэффициентов обслуживаемости сведены в табл. 12.3. По сравнению с аналогичными показателями для системы базовой конфигурации общее число событий мини-системы больше вследствие более низкого

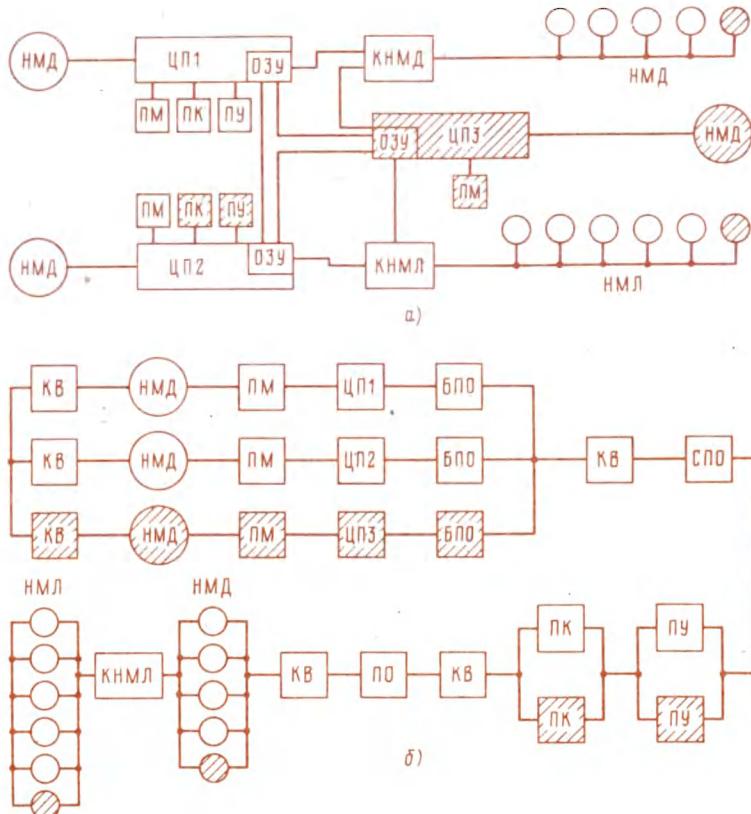


Рис. 12.9. Многопроцессорная мини-система:

а – конфигурация; *б* – эквивалентная модель для расчета коэффициента обслуживаемости; *БПО* – базовое программное обеспечение; *СПО* – специальное программное обеспечение. Резервные устройства заштрихованы

Таблица 12.3. Вычисление характеристик многопроцессорной мини-системы (см. рис. 11.4, 11.5 и табл. 11.3, 11.6)

Устройства	Число событий на 1000 ч		Число системных отказов на 1000 ч	Среднее время простоя, ч	Коэффициент обслуживаемости	
	Исходное	Поправочные коэффициенты				
ЦП	0,28	2	0,56	0,56	1,25	0,99930
ЗУ	0,49 · 2	2	1,96	1,96	1,25	0,99756
НМД	1,2	2 · 0,7	1,68	1,68	2,33	0,99610
Пишущая машинка	3,9	0,5 · 2 · 0,7	2,73	0,68	2,0	0,99457
Все оборудование одной системы	–	–	6,93	4,88	–	0,99758
Процедуры восстановления	–	–	–	4,88	0,3	0,99854
Базовое программное обеспечение	25	0,04	1,0	1,0	0,3	0,99970

Табл. 12.3 (продолжение)

Устройства	Число событий на 1000 ч		Число системных отказов на 1000 ч	Среднее время простоя, ч	Коэффициент обслуживаемости
	Исходное	Поправочные коэффициенты			
Одна система в целом			7,93	5,88	0,98584
Две системы из трех			[23,79]	[11,76]	[0,99940]
Процедуры восстановления				11,76	0,3
Специальное программное обеспечение	25	0,15 · 2	[7,5]	[7,5]	0,3
Печатающее устройство	5,4	2	10,8	2,33	0,97545
Одно устройство из двух	—		[10,8]		[0,99940]
Устройство ввода с перфокарт	5,1	0,5 · 2	5,1	2,33	0,98826
Одно устройство из двух			[5,1]		[0,99986]
Контроллер НМД ЗУ	0,22 0,49 · 0,5	2	0,44 0,49	1,25 1,25	0,99939 0,99939
Процедуры восстановления			0,93	0,46	0,2
Программное обеспечение	6	0,04	0,24	0,2	0,99995
Весь контроллер в целом			[1,17]	[0,46]	[0,99860]
НМД	1,2	2	2,4	2,33	0,99444
Четыре накопителя из пяти			[9,6]		[0,99969]
Контроллер НМЛ	0,085	2	0,17	1,25	0,99979
Процедуры восстановления			0,085	0,2	0,99998
Весь контроллер в целом			[0,17]	[0,085]	[0,99977]
НМЛ	2,1	2	4,2	2,33	0,99031
Пять накопителей из шести			[21,0]		[0,99863]
Вся система в целом			[79,13]	19,805	[0,98963]
П р и м е ч а н и е: Для вычисления полной интенсивности событий системы сложить значения соответствующих показателей, обведенных рамкой, для вычисления полного коэффициента обслуживаемости системы умножить коэффициенты, обведенные рамкой.					

качества периферийного оборудования, однако системных отказов меньше, поскольку электронная аппаратура проще, а программное обеспечение имеет меньший объем. Полный коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости мини-системы, равен 1,04 %, тогда как для однопроцессорной системы он равен 2,22 и для двухпроцессорной системы базовой конфигурации – 1,52 %. Указанное различие можно объяснить простотой оборудования и программного обеспечения, но в основном все-таки тем, что время восстановления мини-системы меньше, хотя и не обязательно.

Полный коэффициент обслуживаемости мини-системы в дальнейшем может значительно снизиться при недостатке испытательных программ для проверки периферийных устройств, выполняемой одновременно с работой пользователей, что случается достаточно часто. Поскольку специальное программное обеспечение написано для одной конфигурации, может возникнуть значительная задержка в применении системы, и потребуется частое использование полной конфигурации для тестовых проверок и поиска неисправностей. Полная интенсивность исследований системы возрастает почти до 24 исследований на 1000 ч, или до 1,44 исследований на неделю (60 ч). При среднем времени исследования около 3 ч даже при введении профилактического обслуживания уровень безотказности системы реально не мог бы поддерживаться инженерами, присутствующими на месте ее функционирования, а при переходе к обслуживанию по вызову коэффициент обслуживаемости снизился бы еще больше. Если систему комплектовать не двумя, а тремя процессорами, полный коэффициент обслуживаемости достиг бы примерно 96,2 %, а коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, – 3,9 % (т.е. стал бы значительно ниже, чем в системе базовой конфигурации) в основном из-за того, что каждая мини-система очень чувствительна к отказам пультовых пишущих машинок и системных дисков, однако при введении резервных периферийных устройств коэффициент обслуживаемости можно увеличить почти на 1,8 %.

ПОДСИСТЕМЫ СВЯЗИ

Подсистемы связи также можно представлять эквивалентными моделями для расчета обслуживаемости и безотказности, которой обладает подсистема с точки зрения удаленного пользователя. В то же время полезно учитывать впечатления пользователя и его удовлетворенность, т.е. чисто человеческие качества, которые могут быть важнее, чем обеспечение реальной надежности. Например, поскольку пользователь ощущает свою удаленность от вычислительной системы, для него может быть неприемлемой интенсивность отказов, обычно считающаяся нормальной; вместе с тем его может удовлетворить высокая интенсивность отказов, если он постоянно получает информацию о состоянии неисправной системы.

При рассмотрении всей системы в целом, разработанной так, чтобы в высшей степени удовлетворить пользователей и при этом от хозяина системы требовалась бы минимальные затраты, полезно оценивать безотказность с помощью "числа жалоб пользователей на 1000 ч"; например,

при наличии в системе 400 терминалов, теряющих возможность обслуживания пользователей из-за 50 системных отказов на 1000 ч, указанная безотказность системы равна 20 000 потенциальных жалоб на 1000 ч.

Надежность линий связи

При изучении надежности линий связи следует принимать во внимание два фактора: во-первых, случайные ошибки, вероятно, имеющие место, даже когда линия считается работоспособной, и, во-вторых, обрывы линии, неизбежно влекущие за собой проведение незапланированных процедур обслуживания.

Случайные ошибки. Приводительность линии в нормальных условиях эксплуатации при наличии случайных ошибок зависит от типа и длины линии, скорости передачи информации, длины информационных блоков, наличия средств обнаружения и исправления ошибок, интенсивности ошибок в линии и распределения ошибок, времени задержки линии и т.д. Первым следствием возникновения случайных ошибок является уменьшение пропускной способности линии вследствие необходимости повторной передачи искаженных информационных блоков, а другим – непредвиденные прерывания функционирования или необнаруженные ошибки, к которым неизбежно приводят вмешательство оператора и повторная передача информации для завершения работы.

Для примера рассмотрим характеристики линии связи со скоростью передачи 2400 бод:

Интенсивность ошибок в одном бите	$1 \text{ из } 10^5$ бит
Частота передачи ошибочных блоков длиной 5000 бит	2 %
Число передаваемых блоков за 1000 ч	10^6
Число блоков с ошибками (в основном успешно переданных вторично)	$2 \cdot 10^4$
Число событий, вызывающих прерывание работы терминалов или необнаруженные ошибки, на 1000 ч	20

Хотя повторная передача информационных блоков при заданной длине блоков снижает пропускную способность до 98 % номинальной, со стороны пользователя, возможно, не будет жалоб (он может даже не заметить этого снижения), поскольку не требуется никакого вмешательства оператора.

Обрывы линий. По данным, известным в Великобритании, обычно обрывы линий в среднем происходят не чаще 2 раз в год и линия выходит из строя на период длительностью от 2 ч до 2 дней. Кроме того, известно, что признаком близящегося обрыва может быть возникновение перемежающихся отказов, следствием которых являются дополнительные повторные передачи информации или периодические отключения линии. В последнем случае, требующем вмешательства оператора, можно ожидать по меньшей мере два события на обрыв.

Полная надежность линии. В Великобритании, если в Министерстве связи невозможно получить более точные данные, для оценки надежности линий связи можно использовать характеристики, подобные приведенным в следующих примерах: коэффициент обслуживаемости 0,998 и безотказность 10 событий на 1000 ч в отдельной линии.

Коммутируемые линии телефонной сети. Обычно интенсивность ошибок в одном бите для коммутируемых линий телефонной сети равна 1 на 10^3 – 10^4 переданных бит. Большинство неисправностей в кабелях проявляется в виде задержки при соединении с абонентом, но некоторые из них вызывают разъединение во время разговора; эти неприятности обычно преодолеваются повторным набором номера абонента. Полный коэффициент обслуживаемости отдельной линии, как указано выше, составляет примерно 0,998, хотя интенсивность событий, вероятно, возрастает, особенно в тех случаях, когда линия не обеспечена эффективными средствами обнаружения и исправления ошибок.

Модемы

Обычно производители утверждают, что наработка на отказ модемов (модуляторов – демодуляторов) равна примерно 15 000 ч, что составляет 1 отказ в 2 года при непрерывной эксплуатации. На практике этот показатель имеет место при менее интенсивном использовании. Отказы модемов могут быть перемежающимися и приводить к периодическим прерываниям обслуживания пользователей; таким образом, интенсивность событий составляет около 1 отказа на 1000 ч, а коэффициент обслуживаемости равен 0,999 или 0,997, если учитывать время ожидания при обслуживании.

Терминалы

В следующих параграфах приводятся примеры вычисления коэффициентов обслуживаемости и интенсивностей событий для терминалов различных типов. Предполагается, что коэффициент обслуживаемости оборудования центральной части системы составляет 0,978, а интенсивность отказов системы равна 25 отказам на 1000 ч (с учетом характеристик мультиплексора линии, осуществляющего прекращение передачи при каждом событии и повторное подключение терминалов для завершения работы).

Группы удаленных терминалов обычно обладают периферийным оборудованием с низкой стоимостью и обслуживаются по вызову. После подсоединения к линии они используются в непрерывном стартстопном режиме. Поэтому естественно ожидать, что коэффициент обслуживаемости периферийного оборудования будет довольно низок. Для вычисле-

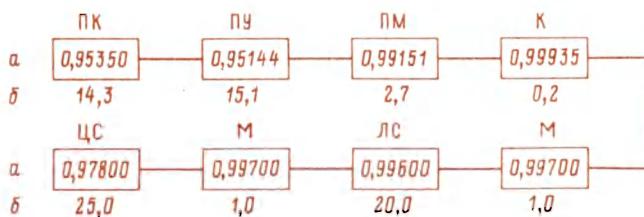


Рис. 12.10. Группа удаленных терминалов:

К – контроллер; М – модем; ЛС – линия связи; ЦС – центральная часть системы; *a* – коэффициенты обслуживаемости; *b* – число событий на 1000 ч

ний, результаты которых указаны на рис. 12.10, в качестве исходных данных взяты характеристики оборудования, приведенные в гл. 11, причем предполагается, что оборудование обладает высокой ремонтопригодностью, низкой скоростью, средним качеством и функционирует в удовлетворительных окружающих условиях при средней загруженности (а пишущие машинки – даже при очень низкой загруженности). При вычислении коэффициента восстановления терминалов предполагается, что среднее время восстановления, затрачиваемое на сортировку карт и повторение ошибочных заданий, равно 0,2 ч.

Значения полного коэффициента обслуживаемости и безотказности приведены ниже:

	Коэффициент обслуживаемости	Число событий на 1000 ч
Терминал	0,89891	32,3
Линия связи и модемы	0,99000	22,0
Центральная часть системы	0,97800	25,0
В целом	0,87034	79,3
Коэффициент восстановления	0,98439	
В целом с учетом коэффициента восстановления	0,85675	

Полученные значения полного коэффициента обслуживаемости и безотказности не могут удовлетворить пользователя терминалов, особенно если он принимает во внимание значения этих характеристик на коротких периодах. Основная часть жалоб пользователей на чрезмерно большое число событий связана с устройствами, непосредственное управление которыми ему недоступно, т.е. с линиями и оборудованием центральной части системы, хотя именно терминал обладает очень высоким коэффициентом, обратным коэффициенту обслуживаемости.

Если предположить, что пользователь группы удаленных терминалов допускает возникающее иногда замедление процесса решения его задания, уже введенного в систему, то его главное требование могло бы состоять в организации режима, при котором после загрузки задания с устройства ввода он ожидал бы печати правильных результатов через некоторое время. Реализовать такой режим можно с помощью конфигурации, изображенной на рис. 12.11, где копия задания, переданная в линию связи, одновременно записывается на диск и хранится там до тех пор, пока пользователь не убедится, что принял правильные результаты. Накопитель на маг-

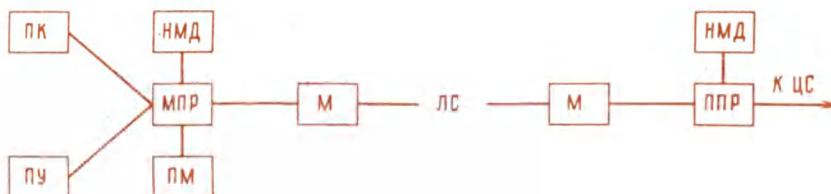


Рис. 12.11. Улучшенная конфигурация группы удаленных терминалов:
ППР – периферийный процессор



Рис. 12.12. Терминал для передачи сообщений по запросу:

ЛЛС – локальная линия связи; М – модемы; К – концентратор (мини-система); ГЛС – главная линия связи; а – коэффициенты обслуживаемости; б – число событий на 1000 ч; в – число событий, искажающих сообщения на 1000 ч

битных дисках, соединенный с периферийным процессором, является буфером, позволяющим не прерывать передачи информации по линии при возникновении любых отказов в центральном процессоре. Указанные НМД обеспечивают возможность автоматического восстановления после возникновения любых отказов в линии связи.

Приведенная конфигурация может удовлетворить пользователя, поскольку уменьшается потребность в инициализации оператором процедуры восстановления, хотя нет гарантий, что коэффициент обслуживаемости значительно улучшится. И все же можно добиться улучшения коэффициента обслуживаемости, если ввести в состав терминала резервное периферийное оборудование или установить терминал в полностью кондиционируемом помещении.

Терминалы для передачи сообщений по запросу. На рис. 12.12 изображена эквивалентная модель для расчета обслуживаемости устройства, которое могло бы быть использовано для передачи сообщений по запросу. Терминалы опрашиваются центральной частью системы, причем предполагается, что никакие события типа сбоев в линии связи не вызывают прекращения опроса.

Так как терминал занимает линию не весь период сообщения, никакие события типа сбоев в линии не оказывают влияния на работу, проводимую в это время. Например, пусть запрос состоит из 100 символов, а ответ из 500 символов, в этом случае одно сообщение может длиться 5 мин, причем большая часть этого времени затрачивается на введение данных через видеодисплей, исправление ошибок и проверку полученного ответа; время передачи может быть 5 с и время работы процессора 1–2 с. Таким образом, число событий, оказывающих влияние на сообщение, зависит от длительности существования состояния отказа. Кроме того, если считать, что стандартная процедура восстановления, применяемая при возникновении событий (кроме событий в собственно дисплее), состоит в передаче запроса, хранящегося в памяти видеодисплея, то время восстановления равно нескольким секундам, а коэффициент восстановления – почти 1.

Согласно рис. 12.12 полный коэффициент обслуживаемости достигает 94 %, в интенсивность событий составляет 75 событий на 1000 ч, однако из-за относительно низкой загруженности линий связи и центральной части системы по сравнению с загруженностью видеодисплея полная интенсивность событий равна 26 событиям на 1000 ч. Если же учитывать полное время использования системы, то при низкой загруженности видеодис-

плея коэффициент обслуживаемости и интенсивность событий, видимо, будут несколько лучше.

Отметим, что некоторые отказы линий, ответвляющихся от главной линии передачи, могут привести к невозможности использования главной линии. Отсюда следует, что при значительном числе ответвлений коэффициент обслуживаемости главной линии будет ниже, чем указано на рис. 12.12.

Возможность улучшения надежности терминалов, применяемых для передачи сообщений по запросу, зависит от расположения терминалов; например, если несколько терминалов установлено в одном и том же здании, может не потребоваться резервного видеодисплея; в других случаях имеется резервное устройство, вводимое в работу в короткий срок; иногда главная линия дублируется или выполняется кольцевой или вводятся схемы переключения на запасные линии.

Для удовлетворения пользователей полезно применять периферийные процессоры со средствами оповещения пользователей терминалов о причинах задержек в центральной части системы.

Терминалы, работающие в режиме разделения времени. На рис. 12.13 изображена эквивалентная модель для расчета обслуживаемости терминала, применяемого в системах с разделением времени. Полная надежность очень сильно зависит от вида выполняемой работы. Например, среднее задание может состоять из следующих шагов:

Шаг задания	Время исполь- зования линии, мин	Число переда- емых символов
Ввод	15	1000
Редактирование	5	100
Выполнение	5	
Вывод результатов (на различных шагах задания)	5	2500
	<hr/>	<hr/>
	30	3600

Если считать, что в центральной части системы программа запоминается на диске после ввода и редактирования, то среднее время, затрачиваемое оператором на восстановление после неожиданного обрыва, состави-

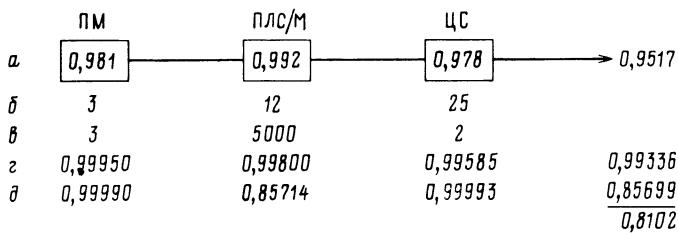


Рис. 12.13. Терминал, работающий в режиме разделения времени:

ПЛС/М – переключатель линий связи, линия связи и модем; **а** – коэффициенты обслуживаемости устройств; **б** – число событий на 1000 ч (искажение сообщений); **в** – число событий на 1000 ч (при обрывах линии связи); **г** – коэффициенты восстановления (при обрывах линии связи); **д** – коэффициенты восстановления (при искажении сообщений)

ло бы примерно 10 мин (с учетом времени повторной записи информации и т.д.).

В терминалах такого типа средства обнаружения и исправления ошибок включают устройства ретрансляций принятой информации обратно ее источнику, проверку запрещенных символов и команд, поэтому при искажении данных обычно требуется некоторое число исправлений: одни ошибки исправляются на входе с помощью пишущей машинки, другие – в процессе редактирования, а чтобы исправить ошибки, появившиеся в выходных данных, иногда может потребоваться даже повторное выполнение здания. Таким образом, время восстановления при случайных искажениях составляет около 2 мин.

Интенсивность событий, равная 5 событиям на час, является типичной для пользователей, имеющих опыт обработки заданий, подобных приведенному в примере, в системах с разделением времени, подключаемых в общедоступной коммутационной сети.

Полный коэффициент обслуживаемости, составляющий согласно рис. 12.12 81 %, очень низок главным образом из-за частых искажений данных.

Коэффициент обслуживаемости терминалов, работающих в системах с разделением времени, можно сделать приемлемым с помощью введения резервных пишущих машинок, однако основной путь к его улучшению связан с процедурами восстановления: как указывалось ранее, в качестве буфера, не пропускающего ошибки центральной части системы к пользователю, мог бы быть использован периферийный процессор, дополнительное повышение коэффициента обслуживаемости обеспечивают средства обнаружения и исправления ошибок, простые способы редактирования и автоматическое сохранение всех шагов задания для преодоления влияния обрывов линии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ, НАПИСАННЫЕ НА ЯЗЫКЕ ФОРТРАН

Как указывалось в гл. 10, во время приемных испытаний полезно проверить процессор и все периферийное оборудование под управлением операционной системы. Для упрощения этой задачи могут быть написаны программы на языках высокого уровня, таких как ФОРТРАН, КОБОЛ, АЛГОЛ и БЭЙСИК. В этом приложении приводятся краткое описание, тексты и типичные результаты ряда программ, написанных на языке ФОРТРАН, которые могут быть использованы для создания самых разнообразных режимов применения. Программы представлены в следующей последовательности:

- FOPR — тесты процессора,
FODK¹ — тесты накопителей на магнитных дисках,
FOMT¹ — тесты накопителей на магнитных лентах,
FOLP — тесты печатающих устройств,
FOCP — тесты устройств вывода на перфокарты,
FOCR — тесты устройств ввода с перфокарт,
FOTP — тесты устройств вывода на перфоленту,
FOTR — тесты устройств ввода с перфоленты.

Полезно выполнять программы, используя каждый из имеющихся в наличии компиляторов, так как разные компиляторы создают различные последовательности команд в объектной программе. Однако для обеспечения максимальной загруженности тесты FOPR процессора следует транслировать с помощью неоптимизированного компилятора, а тесты периферийного оборудования — максимально оптимизировать, чтобы сократить время работы центрального процессора, которое может сильно увеличиваться при полной проверке.

Каждая программа имеет параметры, значения которых определяют время выполнения программы. Параметры тестов процессора можно выбрать так, чтобы проверка продолжалась любое наперед заданное время даже для очень большого процессора, а расширяя область значений параметров, можно испытать процессор при работе с числами из широкого диапазона. Параметры тестов накопителей на магнитных дисках и лентах обычно можно выбрать так, чтобы обеспечивались запись и считывание файлов любой заданной длины. С помощью тестов медленных периферийных устройств выполняется более ограниченный круг проверок, однако при необходимости увеличения времени проверок эти тесты можно повторить несколько раз.

В описаниях программ приводятся формулы для оценок времени выполнения и примеры временных затрат при заданных быстродействии процессора и скоростных характеристиках периферийных устройств.

FOPR00 — тест процессора

Назначение. Программа предназначена для проверки правильности обработки процессором чисел с плавающей запятой в широких пределах.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике.

Описание. Гамма-функция имеет вид

$$\Gamma(l) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{l-1} dx = \int_0^{\infty} y dx.$$

Если l — целое положительное число, то $\Gamma(l) = (l-1)!$

Программа вычисляет и печатает значения десяти гамма-функций ($l = 1, 2, 3, \dots, 10$) двумя способами:

- 1) вычислением $(l-1)!$;
- 2) интегрированием по формуле Симпсона.

¹ Большинство этих тестов можно применять для проверки накопителей как на магнитных дисках, так и на магнитных лентах.

По формуле Симпсона определяется площадь под отрезком кривой:

$$\text{Площадь} = h(y_1 + 4y_2 + y_3)/3,$$

где h – шаг квантования; y_1 вычисляется в точке x_1 , y_2 – в точке $x_1 + h$, y_3 – в точке $x_1 + 2h$.

Программа также вычисляет контрольную сумму по разности значений интеграла на соседних интервалах квантования.

Переменные. MM: значение интеграла вычисляется в пределах от X = 0 до X = 2 MM; MS: шаг h равен 1/MS.

Отметим, что при различных значениях параметров получаются различные результаты.

Время выполнения. Время выполнения примерно пропорционально произведению MM x MS.

Значения параметров для 15-минутной проверки процессора с быстродействием 1000 тыс. команд/с:

$$MM = 50; \quad MS = 4000.$$

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Чтобы избежать прерывания из-за потери точности в некоторых системах, следует иметь в виду, что наименьшее число, используемое в операциях умножения, равно:

$$0,37 \cdot 10^{-43} \text{ при MM} = 50;$$

$$1,8 \cdot 10^{-35} \text{ при MM} = 40;$$

$$1,0 \cdot 10^{-30} \text{ при MS} = 10^3;$$

$$1,0 \cdot 10^{-40} \text{ при MS} = 10^4;$$

$$1,0 \cdot 10^{-50} \text{ при MS} = 10^5.$$

И все же даже при потере точности полученные результаты корректны, если прерываний не возникало.

Текст программы FOPR00

```
C*****PARAMETERS*****
MM=50
MS=600
C*****PARAMETERS*****
GF=1.0
WRITE(6,50)
50 FORMAT(5H      G,10X,14HGAMMA FUNCTION)
AC=0.0
AY=0.0
YC=0.0
DO 600 I=1,10
IG=I+1
GS=I
A=0.0
Y=0.0
X=0.0
GF=GF*GS
WRITE(6,100)IG,GF
AN=1.0/FLOAT(MS)
DO 500 J=1,MM
DO 500 K=1,MS
XA=X+AN
XB=XA+AN
YA=EXP(-XA)*XA**GS
YB=EXP(-XB)*XB**GS
AY=(AN/3.0)*(Y+4.0*YA+YB)
A=A+AY
YC=YC+YA-YB
X=XB
```

```

500 Y=YB
  WRITE(6,100)IG,A
100 FORMAT(14,F35.24)
600 CONTINUE
  WRITE(6,200)AC,YC
200 FORMAT(8H SUMS = ,2E30.24)
  STOP
END

```

Результаты корректной обработки программы

G	GAMMA FUNCTION
2	1.00000000000000000000000000000000
2	1.00000000000000000000000000000000
3	2 00000000000000000000000000000000
3	1.998812675476074000000000
4	6.00000000000000000000000000000000
4	5.999705314636231000000000
5	24.000000000000000000000000000000
5	23.97731018066406000000000000
6	120.000000000000000000000000000000
6	119.99821472167970000000000000
7	720.000000000000000000000000000000
7	719.59790039062500000000000000
8	5040.000000000000000000000000000000
8	5033.710937500000000000000000000000
9	40320.000000000000000000000000000000
9	40322.093750000000000000000000000000
10	362880.000000000000000000000000000000
10	362822.375000000000000000000000000000
11	3628800.000000000000000000000000000000
11	3627311.00000000000000000000000000000000
SUMS = 0.0	0.109977798461914000000000E 03

FOPR01 – тест процессора и запоминающего устройства

Назначение. Программа предназначена для проверки оперативного запоминающего устройства (используются арифметические операции только над числами с фиксированной запятой).

Автор. Р.Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике.

Описание. Программа воспроизводит специальные наборы данных, используя операции получения дополнительных кодов, однако она может быть легко модифицирована для построения тех же наборов с использованием операций получения обратных кодов. В программе определен двумерный массив любого заранее заданного размера и учитывается длина машинного слова. Программа состоит из трех процедур:

- 1) записи наборов, состоящих из одних единиц, в каждый элемент массива;
- 2) записи в каждый элемент массива наборов, состоящих из нулей и одной единицы (в последовательных элементах единицы занимают различные позиции);
- 3) считывания и проверки записанных наборов. В случае несравнения печатается сообщение, например: I21 J5 WAS 8191 EXPECTED 8192.

Процедуры 1–3 повторяются до тех пор, пока не будет проверен каждый бит каждого элемента. В четных проходах программы сначала записываются нулевые наборы, а затем наборы, состоящие из единиц и одного нуля.

В приведенном тексте программы осуществляется последовательный доступ к памяти, отведенной под заданный массив. Если во всех трех процедурах изменить порядок циклов по J и I, то доступ к памяти перестанет быть последовательным. Например, при определении массива IA (256, 256) при изменением порядке циклов по J и I доступ осуществляется к каждому 256-му элементу; в системах с виртуальной памятью такая перестановка может быть использована для испытаний

системы страничной организации памяти (в предположении, что другие программы выполняются только для заполнения физической памяти), поскольку следующая страница должна быть проверена на передачу информации из памяти на магнитный барабан или диск.

Переменные. Двумерный массив IA (A, A) задает размер проверяемой памяти; IB определяет размер памяти, к которой ведется доступ, и ее значение должно быть не более A; IC – число битов в слове минус 1 (или меньше); NB – число повторений программы (обычно не менее 2); NA – число повторений процедур 1 и 3.

Время выполнения. Время выполнения примерно пропорционально произведению $NB \cdot IC \cdot IB^2 \cdot (1,25 \cdot NA + 1)$.

Значения параметров, при которых программа требует 15 мин процессорного времени при быстродействии процессора 1000 тыс. команд/с:

$$IB = 256; IA(256, 256); NB = 2;$$

$$IC = 31; NA = 2.$$

Отметим, что если циклы по J и I переставлены и происходит передача информации из памяти на диск, то параметры необходимо уменьшить для того, чтобы программа завершилась за приемлемое время.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Параметр IC должен задаваться в соответствии с длиной машинного слова.

Для выполнения программы может потребоваться значительное процессорное время, минимизировать которое можно с помощью команд обращения к памяти. Это время сильно зависит от оператора $MM = 2 ** M + 1$. Поэтому в тех случаях, когда есть возможность воспользоваться функцией сдвига, имеет смысл внести в программу следующие изменения:

в цикле DO 110 ... заменить последовательность операторов

$$MM = 2 * * M + 1$$

$$MM = MM * ID$$

$$IA(I, J) = MM + KK$$

на

$$MM = SHIFT(ID, M)$$

$$IA(I, J) = MM$$

и аналогичную замену провести в цикле DO 120 ...

Кроме того, заменить оператор

$$140 ID = -1$$

на

$$140 ID = -2.$$

Указанные изменения должны быть использованы, когда операцию возведения в степень нельзя выполнить для операндов длиной в целое слово.

Программа может быть оптимизирована с помощью подходящего компилятора – в отдельных случаях оператор $2 ** M$ представляется командой сдвига. Оптимизация ведет к увеличению скорости доступа к памяти, что является весьма выгодным обстоятельством.

Иногда возможны ограничения на емкость памяти, занимаемой одной программой, однако для заполнения всей памяти можно одновременно обрабатывать несколько копий предлагаемого теста.

Текст программы FOPR01

```
C*****PARAMETERS*****
DIMENSION IA(64,64)
IB=64
IC=31
NA=2
NB=2
```

```

C-----+PARAMETERS-----+
      ID=1
      DO 200 K=1,NB
      KK=K/2+2-K
      WRITE(6,99)KK
 99 FORMAT(I16)
      IE=IC-1
      DO 120 N=1,IC
      M=N-1
      WRITE(6,99)M
      DO 100 JJ=1,NA
      DO 100 J=1,IB
      DO 100 I=1,IB
      IA(I,J)=KK
 100 CONTINUE
      DO 110 J=1,IB
      DO 110 I=1,IB
      MM=2**M+1
      MM=MM*ID
      IA(I,J)=MM+KK
      M=M+1
      IF(M-IE)110,110,105
 105 M=0
 110 CONTINUE
      DO 120 JJ=1,NA
      M=N-1
      DO 120 J=1,IB
      DO 120 I=1,IB
      MM=2**M+1
      MM=MM*ID+KK
      IF(IA(I,J)-MM)128,130,128
 128 WRITE(6,129)I,J,IA(I,J),MM
 129 FORMAT(2H I,I4,2H J,I4,2X,3HWAS,I10,2X,8HEXPECTED,I10)
 130 M=M+1
      IF(M-IE)120,120,125
 125 M=0
 120 CONTINUE
      IF(ID)145,145,140
 140 ID=-1
      GO TO 200
 145 ID=1
 200 CONTINUE
      STOP
      END

```

Результаты корректной обработки программы (значения параметров указаны в тексте программы)

```

-1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14

```

```
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
0  
0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
etc. to  
30
```

FOPR02 – тест процессора

Назначение. Программа предназначена для проверки процессоров при вычислениях с использованием чисел с плавающей запятой из широкого диапазона.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике.

Описание. Программа вычисляет значения бинома $(Q + P)^N$, где N изменяется от 1 до значения переменной IE, которая выбирается в соответствии с вычислительными возможностями процессора, для каждого значения Q в диапазоне от 0,1 до 0,9. Последовательно вычисляемые суммы разложения бинома перемножаются, и конечный результат должен быть примерно равен 1 (что является свидетельством потенциальной точности – см. "Результаты корректной обработки программы"). Кроме того, суммируются значения бинома для каждого значения переменной N , причем результат должен приблизительно быть равным заданному значению IE. Заметим, что ошибка в одном бите хотя бы одного вычисления, по всей вероятности, должна сказаться на конечном результате.

Переменные. IA задает число повторений всей программы. IB, ID определяют значение переменной $Q = 8 \cdot IB/ID$. Значение переменной IE определяет максимальное значение N. Отметим, что результат изменяется при изменениях значений переменных.

Время выполнения. Время выполнения примерно пропорционально величине

$$\frac{IA \cdot IB}{ID} \left(\frac{IE}{77} \right)^2$$

Значения параметров, при которых для выполнения программы требуется 15 мин процессорного времени при быстродействии процессора 1000 тыс. команд/с:

IA = 6; IB = 120; ID = 1; IE = 77.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Максимальное и минимальное воспроизводимые программой числа имеют порядок 10^{22} и 10^{-IE} . Поэтому значение переменной IE следует задавать с учетом возможностей конкретных систем, например для систем с 32-разрядным словом IE = 77, а для систем с 36- или 16- разрядным словом IE = 37.

Если значение IE слишком велико, то результат равен 0.

Текст программы FOPR02

```
DIMENSION COMB(501)
WRITE(6,250)
250 FORMAT(8H1TSURL02)
C*****PARAMETERS*****
IA=1
IB=120
ID=4
IE=77
C*****PARAMETERS*****
IC=9*IB
AA=10*IB
DO 600 M=1,IA
BC=0.0
BB=1.0
DO 500 N=1,IE
DO 400 K=IB,IC,ID
AK=K
L=N+1
MM=L/2
COMB(1)=1.0
COMB(L)=1.0
DO 120 I=2,MM
AI=I-1
L=L-1
AN=L
COMB(I)=AN/AI*COMB(I-1)
120 COMB(L)=COMB(I)
IF(N+1-MM+2)150,151,150
150 COMB(L-1)=(AN-1.0)/(AI+1.0)*COMB(L)
151 L=N+1
Q=AK/AA
P=1.0-Q
BI=Q*N
BII=BI
DO 160 I=2,L
BI=BI+COMB(I)/COMB(I-1)*P/Q
160 BII=BI+BII
400 BB=BB+BII
500 BC=BC+BII
WRITE(6,200)M,BB,BC
200 FORMAT(I6,2F30.24)
600 CONTINUE
STOP
END
```

Результаты корректной обработки программы (значения параметров указаны в тексте программы)

IBM 360

1 0.679638266563415500000000 76.999053955078120000000000

ICL 1900

1 0.999998250095814000815153 76.99999985090994414349552

FOPR03 – тест процессора

Назначение. Программа предназначена для проверки процессоров, особенно тех из них, которые допускают использование команд перехода.

Автор. Программа создана в RHEL Rutherford и модифицирована в Центральном агентстве по вычислительной технике, где в нее добавлена индикация неправильных переходов.

Описание программы. Программа содержит все команды переходов, которые в действительности транслируются в команды загрузки и перехода. Вторая половина программы производит последовательность различных команд перехода в первую часть программы.

Переменные. N : – число повторений программы равно N^2 .

Время выполнения. Время выполнения примерно пропорционально N^2 .

Значение параметра N , при котором для выполнения программы требуется 15 мин процессорного времени при быстродействии 1000 тыс. команд/с:

$N = 4000$.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Не требуются.

Текст программы FOPR03

C*****PARAMETERS*****

N=4000

C*****PARAMETERS*****

WRITE(6,1)N

1 FORMAT(1I10)

I=-1

J=0

K=1

DO 300 L=1,N

DO 300 M=1,N

GO TO 200

100 IF(I)101,999,999

101 IF(J)999,102,999

102 IF(K)999,999,103

103 IF(I)104,999,999

104 IF(J)999,105,999

105 IF(K)999,999,106

106 IF(I)107,999,999

107 IF(J)999,108,999

108 IF(K)999,999,109

109 IF(I)110,999,999

110 IF(J)999,111,999

111 IF(K)999,999,112

112 CONTINUE

GO TO 300

200 IF(I)201,999,999

202 IF(K)999,999,203

201 IF(J)999,202,999

203 IF(I)204,999,999

205 IF(K)999,999,206

204 IF(J)999,205,999

206 IF(I)207,999,999

```

208 IF(K)999,999,209
207 IF(J)999,208,999
209 IF(I)210,999,999
211 IF(K)999,999,212
210 IF(J)999,211,999
212 CONTINUE
    GO TO 100
999 WRITE(6,2)L,M
    2 FORMAT(8H RUBBISH,2110)
    WRITE(6,3)I,J,K
300 CONTINUE
    WRITE(6,3)I,J,K
3 FORMAT(3I10)
STOP
END

```

Результаты корректной обработки программы

```

4000
-1    0    1

```

FOPR04 – тест процессора

Назначение. Программа предназначена для проверки процессора при вычислениях с двойной точностью и для проверки правильности выполнения различных внутренних функций языка ФОРТРАН.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике.

Описание. Программа вычисляет значения восьми различных выражений при различных значениях переменных (теоретически значения этих выражений должны быть равны единице), перемножает последовательно получаемые результаты для вывода конечного результата на печать, причем это значение также должно быть примерно равно 1. Ошибка хотя бы в одном бите во время вычислений, вероятнее всего, повлияет на правильность конечного результата. Для проверок двойных слов с помощью сдвига и сложения в программу включена подпрограмма вычисления контрольной суммы, причем полная контрольная сумма печатается одновременно с результатом. Используются следующие процедуры и формулы.

Процедура 1. Вычисляются значения левой части тождества $\sin^2 A + \cos^2 A = 1$ при A , изменяющемся от 0 до $\pi/2$. Используемые библиотечные функции DSIN, DCOS, DFLOAT, ** (возвведение в квадрат).

Процедура 2. Вычисляются значения левой части тождества

$$\frac{e^A - e^{-A}}{e^A + e^{-A}} : \operatorname{th} A = 1$$

при A , изменяющемся от 0,0033 до 166,67. Значения, получаемые в процессе вычислений, изменяются в диапазоне от $4,1 \cdot 10^{-73}$ до $2,4 \cdot 10^{72}$. Используются функции DEXP, SNGL, DFLOAT, TANH.

Процедура 3. Вычисляются значения левой части тождества

$$\ln(e^A)/A = 1$$

при A , указанных в процедуре 2. Диапазон величин, получаемых в процессе вычислений, также указан в процедуре 2. Используются функции DEXP, DLOG, DFLOAT.

Процедура 4. Вычисляются значения левой части тождества

$$\sqrt{10^2 \log_{10} A}/A = 1$$

при A , изменяющихся от 1 до $50,0001 \cdot IC$. Используются функции FLOAT, DLOG10, DSQRT и ** (возвведение в квадрат).

Процедура 5. Пусть

$$CA = e^{C+jC} = \cos C + j \sin C.$$

Тогда

$$\begin{aligned} C+jC &= \ln(CA) = \ln \sqrt{(\cos C + j \sin C)^2} = \ln \sqrt{1 \cdot (\cos C + j \sin C)^2} = \\ &= \ln \sqrt{(\cos^2 C + \sin^2 C) (\cos C + j \sin C)^2} = \\ &= \ln \sqrt{(\cos C + j \sin C)(\cos C - j \sin C)(\cos^2 C - \sin^2 C + 2j \sin C \cos C)} \end{aligned}$$

или

$$CA = \ln \sqrt{CA \cdot CA^* \cdot (\cos^2 C - \sin^2 C + 2j \sin C \cos C)};$$

где CA^* – комплексное число, сопряженное CA . Но

$$(|\operatorname{Re}(CA)| + |\operatorname{Im}(CA)|)/(2C) = 1.$$

В процедуре вычисляются значения левой части последнего тождества при C , изменяющемся от $0,6 \cdot 10^{-5}$ до $\pi/2 + \epsilon$, причем ϵ очень мало. Используемые функции FLOAT, SNGL, CEXP, CMPLX, CSQRT, CONJG, COS, SIN, CLOG, DABS, DBLE, REAL, ABS, AIMAG, ** (возвведение в квадрат).

Процедура 6. Вводится обозначение $CA = a + jb$ и вычисляются значения левой части тождества

$$|CA|/\sqrt{a^2 + b^2} = 1$$

при a и b , изменяющихся от 1 до 50,001 и от 50,000 до 0 соответственно. Используемый функции CMPLX, FLOAT, CABS, SQRT, REAL, AIMAG, ** (возвведение в квадрат).

Процедура 7. Два массива заполняются значениями $I \cdot M$ и $1/(I \cdot M)$ соответственно. Затем выбирается минимальное значение из первого массива и умножается на максимальное значение из второго (теоретически результат умножения должен равняться 1), при этом поочередно перебираются все элементы обоих массивов. M и I изменяются от 1 до 10 и от 1 до 50,001 соответственно. Используются функции AMIN0, AMAX0, DFLOAT, MIN0, MAX0, DMIN1, DMAX1.

Процедура 8. Вводится переменная R , равная значению левой части тождества

$$\left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sin C}{\cos C} \right) / C \right]^2 = \left(\frac{C}{C} \right)^2 = 1,$$

и вычисляется значение выражения

$$(-R) \times \left(-R \times \text{"остаток"} \left(\frac{I + 5000}{I + 4000} \right) \times \text{"целая часть"} \left[\frac{I + 0,5}{I} \right] \right)$$

(теоретически равного 1) при C , изменяющемся от 1 до $\pi + \epsilon$ (ϵ – достаточно малое положительное число). Используемые функции FLOAT, SNGL, DBLE, ATAN, SIN, COS, DATAN2, DSIN, DCOS, DSIGN, AINT, MOD.

Переменные. IA – число внешних циклов; IC – число внутренних циклов.

Отметим, что результаты зависят от значений переменных.

Время выполнения. Время выполнения примерно пропорционально величине $IA \cdot (1 + 1,5 \cdot IC)$.

Значения параметров, при которых для выполнения программы требуется 15 мин процессорного времени при быстродействии процессора 1000 тыс. команд/с:

$$IA = 50\,000; IC = 4.$$

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. В вычислительных машинах с 16-разрядным словом максимальное целое число равно 32767, поэтому:

оператор $IB = 50\ 000/IA$ необходимо заменить на $IB = 5000/IA$;
во всех операторах цикла процедур изменить верхний предел, например:

DO 100 I = 1,5001, IB.

В процедуре 7 оператор, помеченный меткой 688, заменить на
 $688E(M)=1.0/(FLOAT(MIN0(I,M))*FLOAT(MAX0(I,M)))$.

В процедурах 2 и 3 вычисляемые числа лежат в диапазоне от $4 \cdot 10^{-73}$ до $2 \cdot 10^{72}$,
если верхние пределы в операторах цикла равны 50 001. Для выполнения программы
на вычислительных машинах с диапазоном чисел от 10^{-38} до 10^{38} эти верхние пре-
делы следует уменьшить (например, DO 100 I = 1,26 000, IB) или вместо оператора
 $A = FLOAT(I)/3000.0$ использовать оператор $A = FLOAT(I)/600.0$.

Текст программы FOPR04

```
REAL *8 RM,PII,A,R,B
REAL *8 D(10),E(10)
COMPLEX *8 CA
COMMON RM
C*****PARAMETERS*****
IA=5000
IC=2
C*****PARAMETERS*****
PI=3.14159265
PII=DBLE(PI/100000.0)
IB=50000/IA
WRITE(6,1)
1 FORMAT(10HFUNCTIONS,18X,6HANSWER,15X,8HSUMCHECK)
C ROUTINE 1
RM=1.0
DO 100 I=1,50001,IB
A=DFLOAT(I-1)*PII
DO 100 J=1,IC
R=DSIN(A)**2+DCOS(A)**2
100 RM=RM*R
WRITE(6,11)
11 FORMAT(8H SIN COS)
CALL SUMCK
C ROUTINE 2
RM=1.0
DO 200 I=1,50001,IB
A=DFLOAT(I)/300.0
DO 200 J=1,IC
SA=SNGL(A)
R=(DEXP(A)-DEXP(-A))/(DEXP(A)+DEXP(-A))/TANH(SA)
200 RM=RM*R
WRITE(6,12)
12 FORMAT(9H EXP TANH)
CALL SUMCK
C ROUTINE 3
RM=1.0
DO 300 I=1,50001,IB
A=DFLOAT(I)/300.0
DO 300 J=1,IC
B=DEXP(A)
R=DLOG(B)/A
300 RM=RM*R
WRITE(6,13)
13 FORMAT(8H LOG EXP)
CALL SUMCK
C ROUTINE 4
RM=1.0
```

```

DO 400 I=1,50001,1B
DO 400 J=1,IC
A=FLOAT(I)+FLOAT(J)
B=2.0*DLOG10(A)
B=10.0**B
R=DSQRT(B)/A
400 RM=RM+R
WRITE(6,14)
14 FORMAT(11H LOG10 SQRT)
CALL SUMCK
C ROUTINE 5
RM=1.0
DO 500 I=1,50001,1B
C=(FLOAT(I)-0.8)*SNGL(PII)
DO 500 J=1,IC
CA=CEXP(CMPLX(C,C))
CA=CSQRT(CA*CONJG(CA)*CMPLX(COS(C)**2-SIN(C)**2,
12.0*SIN(C)*(COS(C))))
CA=CLOG(CA)
R=(DABS(DBLE(REAL(CA)))+ABS(AIMAG(CA)))/(2.0*C)
500 RM=RM+R
WRITE(6,15)
15 FORMAT(11H CEXP CMPLX,5H CLOG/
112H CONJG CSQRT)
CALL SUMCK
C ROUTINE 6
RM=1.0
DO 600 I=1,50001,1B
CA=CMPLX(FLOAT(I),FLOAT(50001-I))
DO 600 J=1,IC
R=CABS(CA)/SQRT(REAL(CA)**2+AIMAG(CA)**2)
600 RM=RM+R
WRITE(6,16)
16 FORMAT(5H CABS,5H REAL,6H AIMAG)
CALL SUMCK
C ROUTINE 7
RM=1.0
DO 700 I=1,50001,1B
DO 688 M=1,10
D(M)=AMIN0(I,M)*AMAX0(I,M)
688 E(M)=1.0/DFLOAT(MIN0(I,M)*MAX0(I,M))
DO 700 J=1,IC
DO 699 N=1,10
A=DMIN1(D(1),D(2),D(3),D(4),D(5),D(6),D(7),D(8),
1D(9),D(10))
D(N)=1000000.0
R=A*DMAX1(E(1),E(2),E(3),E(4),E(5),E(6),E(7),E(8),
1E(9),E(10))
RM=RM+R
699 E(N)=0.000001
700 CONTINUE
WRITE(6,17)
17 FORMAT(12H DMIN1 DMAX1)
CALL SUMCK
C ROUTINE 8
RM=1.0
PII=3.142/1000000.0
DO 800 I=1,50001,1B
C=FLOAT(I)*SNGL(PII*2.0)
DO 800 J=1,IC
R=DBLE(ATAN(SIN(C)/COS(C))/C
1*DATAN2(DSIN(DBLE(C)),DCOS(DBLE(C)))/C

```

```

R=-R+DSIGN(R,DBLE(-1.0))*FLOAT(MOD(I+5000,I+4999))
1+AINT(SNGL(R)/2.0+FLOAT(I))/FLOAT(I)).
800 RM=RM*R
  WRITE(6,18)
18 FORMAT(18H ATAN DATAN2 DSIGN/9H MOD AINT)
  CALL SUMCK
  STOP
END

SUBROUTINE SUMCK
REAL *8 RM,V,VW
COMMON RM
V=RM
VW=0.0
IV=0
DO 111 I=1,100
V=(V-VW)*10.0
VV=SNGL(V)
IW=IFIX(VV)
IV=IV+IW*I
111 VW=DFLOAT(IW)
  WRITE(6,9)RM,IV
9 FORMAT(1H+,15X,D28.20,I10)
  RETURN
END

```

Результаты корректной обработки программы

FUNCTIONS	ANSWER	SUMCHECK
SIN COS	0.99999999999989990000D+00	6716
EXP TANH	0.10000061950621120000D+01	6301
LOG EXP	0.99999999999954110000D+00	6529
LOG10 SQRT	0.99999999998812330000D+00	7747
CEXP CMPLX CLOG		
CONJG CSQRT	0.98467964928105470000D+00	5904
CABS REAL AIMAG	0.99399552456004720000D+00	6622
DMIN1 DMAX1	0.97185013837173690000D+00	6707
ATAN DATAN2 DSIGN		
MOD AINT	0.98721262141963900000D+00	5229

FODK00 – тест накопителя на магнитных дисках (произвольный доступ)

Назначение. Программа предназначена для проверки функционирования одного или двух накопителей на магнитных дисках (или барабанах) при произвольном доступе и произвольном движении магнитных головок.

Автор. Р. Лонгботом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взята MOD-программа).

Описание. Программа состоит из головной части, подпрограммы считывания данных с магнитного диска и подпрограммы генерации случайных чисел. В головной части организована последовательная запись некоторого числа одинаковых записей в два файла, причем каждая запись состоит из последовательности случайных чисел, следующей за номером записи. Затем файлычитываются и данные сравниваются. После этого формируется случайная последовательность номеров записей, соответствующие записи считаются и также сравниваются. В обоих случаях в подпрограмме считывания проверяется, считаны ли именно требуемые записи и корректно ли проведено их сравнение; сообщения обо всех ошибках выводятся на печать. Кроме того, при несравнении данных производится пять повторных попыток считывания тех же записей. Для проверки правильности сообщений об ошибках и повторных попытках считывания используются две процедуры обработки ошибок (см. "Результаты корректной обработки программы"). После считывания первой записи при последовательном считывании принудительно вводится ошибка и после

заголовка CHECK OF FAIL TEST печатается соответствующее сообщение. При считывании 14-й записи во время фазы считывания записей со случайными номерами принудительно вводятся ошибки номера записи и содержимого записи, чтобы проверить сообщения об этих типах ошибок. При завершении программы содержимое всех считанных записей распечатывается, но лишь в тех случаях, когда печатающее устройство исправно.

Переменные. Файлы описываются предположением DEFINE FILE; в приведенном ниже тексте программы определены два файла, состоящие из 1000 записей длиной 100 слов каждая, параметр U определяет режим бесформатного считывания и записи, а переменные IA и IB являются указателями номера записи, которая должна быть записана или считана. В других случаях или в дополнение к указанному оператору файлы описываются с помощью предложений языка управления заданиями. На этом языке обычно определяется физическое устройство, предназначенное для хранения файлов, причем файлы могут быть расположены как на одном устройстве, так и на разных, при этом важно расположить файлы таким образом, чтобы обеспечить возможность правильного подвода магнитных головок ко всем частям файлов (на устройствах с подвижными головками); переменная KA определяет фактическое число записей, составляющих каждый файл; ее значение может быть меньше, чем определено в предложении DEFINE FILE, но должно обеспечивать возможность корректного подвода головок.

Переменная KB определяет число слов, фактически составляющих каждую запись. Значение KB должно быть мало по сравнению с длиной записи, определенной предложением DEFINE FILE, для того чтобы процессорное время, затрачиваемое на проверки, было мало по сравнению с временем обращения к диску. Размерности массивов AA и AB должны быть не меньше значения KB.

Переменная KD определяет число считываемых записей. Размерность массива MA должна быть не меньше значения KD.

Время выполнения. Поскольку операции считывания или записи и проверка не совмещены, полное время выполнения программы складывается из процессорного времени и времени обращения к диску. Общей формулы для оценок процессорного времени привести нельзя, так как эти затраты сильно зависят от типа системы, размеров отдельных записей и значений переменных KA, KB и KD. Время обращения к диску зависит от характеристики используемых устройств, метода доступа и от того, на одном или двух дисках расположены обрабатываемые файлы. Если используется индексно-последовательный метод доступа и файлы расположены на различных устройствах, то при считывании и записи последовательностей время обращения к диску может зависеть от скорости вращения диска. Во всех других случаях можно использовать средние характеристики устройства.

Значения параметров, при которых для выполнения программы требуется 15 мин при быстродействии процессора 1000 тыс. команд/с и среднем времени обращения к диску 38,3 мс (при этом затрачивается примерно 2 мин процессорного времени и 13 мин на обращения к диску) :

файлы состоят из 6000 записей длиной 500 слов; KA = 6000; KB = 25; KD = 6000.

В другой системе с эквивалентными характеристиками процессора и накопителя на магнитных дисках, но с малоэффективным программным обеспечением при затратах процессорного времени около 2 мин параметры могут иметь следующие значения:

KA = 700; KB = 5; KD = 700.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Возможно, предложения определения файлов будут другими и изменятся операторы считывания и записи.

Могут потребоваться дополнительные массивы для целей индексации и другие предложения COMMON.

Операторы установки указателей (IA = I; IB = I; IA = I; IB = I), возможно, потребуется изменить или вообще исключить.

Для сообщений об ошибочных битовых конфигурациях в предложениях FORMAT

с метками 80 и 94 приводимой версии программы используется шестнадцатиричная спецификация Z. В других системах, возможно, потребуется перейти к спецификациям типа O (восьмеричная) или H (буквенно-цифровая).

Приведенная подпрограмма генерации случайных чисел может вызвать прерывание из-за переполнения на вычислительных системах с 16-разрядным словом и должна быть изменена соответствующим образом.

Текст программы FODK00

```
C      THIS IS FODK00 - RANDOM DISK TEST
DIMENSION AA(500),AB(500),MA(5000)
COMMON AA,AB,I,J,KC,KB,MERR,I
COMMON MA,J,MM
C*****PARAMETERS*****
DEFINE FILE 1(1000,100,U,IA)
DEFINE FILE 2(1000,100,U,IB)
KA=500
KB=25
KD=1000
C*****PARAMETERS*****
KC=KB+1
MM=1
WRITE(6,90)
90 FORMAT(1H1,16HRANDOM DISK TEST//)
IA=1
IB=1
IX=22
DO 200 I=1,KA
AA(I)=FLOAT(I)
AB(KB)=FLOAT(I)
DO 100 J=2,KB
L=KC-J
CALL RANDYB(IX,YFL)
AA(J)=YFL
100 AB(L)=AA(J)
WRITE(1'IA)(AA(K),K=1,KB)
WRITE(2'IB)(AB(K),K=1,KB)
200 CONTINUE
WRITE(6,250) KA,KB
250 FORMAT(14H DISKS WRITTEN,I10,10H BLOCKS OF,I10,
17H WORDS //)
II=0
MERR=0
DO 300 I=1,KA
J=I
MA(J)=I
CALL DSKC
300 CONTINUE
WRITE(6,350)
350 FORMAT(19H END OF SERIAL READ///)
IX=1
MM=1
II=-12
DO 400 J=1,KD
CALL RANDYB(IX,YFL)
I=YFL+FLOAT(KA)
MA(J)=I
IF(I)400,400,390
390 CONTINUE
CALL DSKC
400 CONTINUE
WRITE(6,450)
```

```

450 FORMAT(19H0END OF RANDOM READ///7H BLOCKS)
      WRITE(6,500)(MA(J),J=1,KD)
500 FORMAT(1H ,10I6)
      STOP
      END

      SUBROUTINE DSKC
      DIMENSION AA(500),AB(500)
      DIMENSION MA(5000)
      COMMON AA,AB,II,KC,KB,MERR,I
      COMMON MA,JJ,MM
      IERR=0
255  II=II+1
      IA=I
      IB=IA
      READ(1'IA)(AA(K),K=1,KB)
      READ(2'IB)(AB(K),K=1,KB)
258  IG=0
      ABC=FLOAT(I)
      IF(AA(1).NE.ABC) IG=1
      IF(AB(KB).NE.ABC) IG=1
      IF(IG)285,290,285
285  WRITE(6,94) I,ABC,AA(1),AB(KB)
      IERR=IERR+1
      IF(IERR-1)290,287,290
287  WRITE(6,90)
      WRITE(6,95) (MA(M),M=MM,JJ)
      MM=JJ
290  DO 300 J=2,KB
      L=KC-J
      IF(AA(J).EQ.AB(L)) GO TO 300
      IERR=IERR+1
      WRITE(6,80) I,J,AA(J),AB(L)
      IF(IERR-1)300,299,300
299  WRITE(6,90)
      WRITE(6,95)(MA(M),M=MM,JJ)
      MM=JJ
300  CONTINUE
      IF(IERR)370,390,350
350  IERR=-1000
      LERR=1
      IAA=0
370  IAA=IAA+1
      WRITE(6,70)IAA,I
      IF(IAA-5)255,255,380
380  MERR=MERR+LERR
      IF(MERR-100)400,400,385
385  STOP 1
390  IF(II-1)400,395,400
395  WRITE(6,60)
      AA(1)=1.0
      AA(2)=AA(2)+1.0
      GO TO 258
60  FORMAT(19H CHECK OF FAIL TEST)
70  FORMAT(20H END OF READ ATTEMPT, I3,2X,5HBLOCK,I6//)
80  FORMAT(19H COMPARISON FAILURE,6H BLOCK,I6,5H WORD,I4/
     111H DISK 1 WAS,Z20,5X,11H DISK 2 WAS,Z20/)
90  FORMAT(19H BLOCKS READ SO FAR/)
94  FORMAT(27H WRONG BLOCK READ SHOULD BE,I6,3H OR,Z20/
     111H DISK 1 WAS,Z20,5X,11H DISK 2 WAS,Z20/)
95  FORMAT(10I6)
400  RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE RANDYB(I,X)
J=125*I
K=J/8192
I=J-K*8192
X=FLOAT(I)/8192.0
RETURN
END

```

Результаты корректной обработки программы

RANDOM DISK TEST

DISKS WRITTEN 500 BLOCKS OF 25 WORDS

CHECK OF FAIL TEST

COMPARISON FAILURE BLOCK	1 WORD	2
DISK 1 WAS	41155F00	DISK 2 WAS
		4055F000

BLOCKS READ SO FAR

1
END OF READ ATTEMPT 1 BLOCK 1

END OF READ ATTEMPT 2 BLOCK 1

END OF READ ATTEMPT 3 BLOCK 1

END OF READ ATTEMPT 4 BLOCK 1

END OF READ ATTEMPT 5 BLOCK 1

END OF READ ATTEMPT 6 BLOCK 1

END OF SERIAL READ

CHECK OF FAIL TEST

WRONG BLOCK READ SHOULD BE	166 OR	42A60000
DISK 1 WAS	41100000	DISK 2 WAS
		42A60000

BLOCKS READ SO FAR

7	453	209	161	149	153	233	212	118	369
211	405	166							

COMPARISON FAILURE BLOCK	166 WORD	2
DISK 1 WAS	411CFF00	DISK 2 WAS
		40cff000

END OF READ ATTEMPT 1 BLOCK 166

END OF READ ATTEMPT 2 BLOCK 166

END OF READ ATTEMPT 3 BLOCK 166

END OF READ ATTEMPT 4 BLOCK 166

END OF READ ATTEMPT 5 BLOCK 166

END OF READ ATTEMPT 6 BLOCK 166

END OF RANDOM READ

BLOCKS

7	453	209	161	149	153	233	212	118	369
211	405	166	351	391	488	42	348	25	211
496	110	362	326	279	389	152	81	139	433

145	226	327	492	92	12	94	317	241	189
189	158	344	6	362	265	149	214	363	387
408	63	442	274	370	302	349	178	285	182
334	347	403	453	148	31	474	364	39	481
249	166	259	447	476	108	57	179	407	441
183	426	291	415	387	439	378	279	419	467
418	284	30	261	161	179	468	70	357	215
485	146	257	142	329	236	109	210	252	93
165	168	3	465	174	266	332	103	386	255
490	256	51	385	225	175	419	406	288	109
240	67	430	310	264	119	400	25	242	311
448	7	423	394	324	4	56	118	278	267
393	232	60	45	183	487	420	89	177	132

etc

FODK01 – тест накопителя на магнитных дисках или

FOMT01 – тест накопителя на магнитных лентах

Назначение. Программа предназначена для проверки накопителей на магнитных дисках или барабанах с использованием до 10 последовательных бесформатных файлов, либо для проверки до 10 накопителей на магнитных лентах, либо для проверки произвольной комбинации из 10 накопителей на магнитных лентах, дисках и барабанах.

Автор. Л. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике.

Описание. Программа состоит из четырех частей.

Часть 1. Генератор двоичных комбинаций. Создаются следующие последовательности комбинаций: первая последовательность состоит из комбинаций, содержащих по одной единице (поочередно перебираются все разряды), вторая последовательность содержит комбинации, составленные из чередующихся нулей и единиц, комбинации третьей последовательности составлены из чередующихся пар нулей и единиц и т.д. (см. "Результаты корректной обработки программы", где комбинации отдельных последовательностей напечатаны в десятичном и шестнадцатиричном видах после заголовка PATTERNS GENERATED). По всей вероятности, некоторые из построенных комбинаций представляют наиболее трудные случаи. Число генерируемых комбинаций зависит от длины машинного слова, например:

при длине слова : 16 разрядов – 72 комбинации;
 24 разряда – 118 комбинаций;
 32 разряда – 164 комбинации;
 36 разрядов – 188 комбинаций;
 60 разрядов – 342 комбинации.

Часть 2. Генератор последовательностей считывания. В этой части программы создается множество рандомизированных последовательностей, состоящих из логических номеров, присвоенных устройствам (см. "Результаты корректной обработки программы"). Число созданных последовательностей (и записей, образующих каждый файл) кратно числу построенных ранее комбинаций. Число различных последовательностей зависит от числа файлов, например при создании шести файлов генерируется 60 различных комбинаций.

Часть 3. Запись файлов. Файлы записываются по очереди, каждая запись содержит номер файла, номер последовательности считывания, номер комбинации и состоит из различного числа слов с соответствующими комбинациями.

Часть 4. Считывание файлов. По очередичитываются отдельные записи каждого файла, причем номер файла устанавливается в соответствии с созданной ранее рандомизированной последовательностью считывания. Затем записи проверяются на корректность с шаблонами, подготовленными при выполнении части 3. При обнаружении любых несовпадений печатаются сообщения об ошибках, затем файл возвращается к началу записи и производится пять попыток повторного считывания. Для проверки правильности процедур печати сообщений об ошибках и повторного считывания в первую считанную запись принудительно вносится ошибка (см. "Результаты

корректной обработки программы"). Файлы могут также считываться различное число раз.

Переменные. NB равно длине машинного слова; NF – числу записываемых и считывающихся файлов (изменяется от 1 до 10); IFNN определяет логический номер первого файла (например, при $IFNN = 10$ и $NF = 6$ файлам присваиваются номера 10,11, 12, 13, 14, 15); NR определяет число повторений каждой комбинации (для записи более длинных файлов – см. описание части 2); NWB задает длину блока (или записи) в словах; NRD указывает, сколько разчитываются все файлы.

Размерности следующих массивов задаются в соответствии со значениями перечисленных переменных.

Массивы. MA содержит построенные комбинации; MAD и JF используются при генерации последовательностей считывания и содержат логические номера файлов; JA используется для хранения файла последовательностей считывания (размерность этого массива может быть увеличена, если необходимо построить файлы большого объема); LFA содержит записываемые записи или записи, воспроизведенные для сравнения; LIS используется при считывании записей, которые сравниваются с элементами массива LFA; LERR используется для хранения номеров несравнившихся записей.

Размерности массивов LFA, LIS и LERR должны быть не меньше, чем величина NWB + 3.

Время выполнения. Так же как и для программы FODK00, трудно предложить общую формулу для определения времени выполнения.

Если файлы располагаются на различных накопителях, то время обращения к дискам оценивается следующим образом:

1. Время обращения для записи равно $NF \cdot NBC \cdot R$, где NBC – полное число записанных блоков; R – период вращения диска или число, кратное периоду, но превосходящее процессорное время, необходимое для вывода одной записи.

2. Время обращения для считывания равно сумме процессорного времени и величины $NRD \cdot NRD \cdot NBC \cdot HR$, где HR – полупериод вращения диска.

Если файлы располагаются на одном и том же накопителе, то время обращения к диску оценивается иначе:

1. Для накопителей с подвижными магнитными головками: время обращения для записи, равное указанному выше + время обращения для считывания, равное $NRD \cdot NF \cdot NBC \cdot A +$ процессорное время (где A – среднее время доступа).

2. Для накопителей с фиксированными магнитными головками: время обращения для записи + время обращения для считывания, равное $(NRD + 1) \cdot NF \cdot NBC \cdot R$.

Оценка затрат времени на обращение к накопителям на магнитной ленте ведется по формуле

$$NF \cdot (NRD + 1) \cdot [NBC \cdot (T + S) + RW] +$$
 процессорное время,

где T – время продвижения магнитной ленты на один блок данных; S – время запуска и останова лентопротяжного механизма; RW – время перемотки ленты к началу.

Во всех рассмотренных случаях предполагается, что принятый в системе коэффициент блокирования равен значению переменной NWB.

Затраты процессорного времени, необходимого для выполнения программы, пропорциональны величине $(NRD + 1) \cdot NWB \cdot NF \cdot NWC$. Как видно из приведенного ниже примера, эти затраты могут быть весьма значительны, поэтому, если есть возможность, для трансляции программы следует использовать оптимизирующие компиляторы, особенно в тех случаях, когда оптимизатор передает в область ввода-вывода целые блоки, а не отдельные слова. Применение хорошо оптимизирующего компилятора, организующего ввод-вывод сблокированных записей, позволяет уменьшить затраты процессорного времени почти в 10 раз.

Для выполнения программы в однопрограммном режиме на вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с, с шестью накопителями на магнитных дисках (период вращения диска 16,7 мс) и четырьмя НМЛ (скорость записи 64 бит/мм) необходимо 15 мин (из движения ленты 18,75 см/с, плотность записи 64 бит/мм) из которых около 7 мин затрачивается на обращение к накопителям и 8 мин составляя-

ют затраты процессорного времени при неоптимизирующем компиляторе); параметры имеют следующие значения:

NB = 32; NF = 10; NR = 4 (т.е. NBC = 656); NWB = 297; NRD = 3.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Размерности массивов (см. выше) должны подбираться в соответствии со значениями параметров. (Обычная причина некорректной обработки состоит в том, что размерность массива JA слишком мала).

Возможны ограничения по числу файлов, которыми может управлять одна программа.

В некоторых системах нельзя задать параметры так, чтобы работать с целыми словами, используя операцию возведения в квадрат (**), но добиться нужного эффекта можно с помощью функции SHIFT (см. программу FOPR01).

В предложении FORMAT с меткой T7 используется шестнадцатиричное представление данных; если такая возможность отсутствует, следует пользоваться восьмеричным (тип O) или алфавитно-цифровым (тип H) представлением. В некоторых системах нельзя пользоваться оператором BACKSPACE, поэтому следует отказаться от средств возврата к началу записи и повторного считывания.

Текст программы FODK01/FOMT01

```
C*****PARAMETERS*****
DIMENSION MA(400),MAD(10),JF(10),JA(400,10)
DIMENSION LFA(103),LIS(103),LERR(103)
NB=32
C   NB=NUMBER OF BITS IN WORD
NF=4
C   NF=NUMBER OF FILES WRITTEN AND READ
IFNN=10
C   IFNN=LOGICAL NUMBER OF FIRST FILE
NR=2
C   NR=NUMBER OF TIMES PATTERNS REPEATED
NWB=10
C   NWB=NUMBER OF WORDS PER BLOCK
NRD=2
C   NRD=NUMBER OF TIMES ALL SECTIONS READ
C*****PARAMETERS*****
C
C*****PATTERN GENERATION
NH=NB/2
II=NB
IFNM=IFNN-1
NFI=NF+IFNM
NC=NB+2
MA(1)=0
DO 10 I=2,NB
10 MA(I)=2**((I-2)
DO 13 M=1,NH
IN=M-1
IM=2*M
IW=0
NK=NC-IM
DO 13 I=2,NK,IM
IB=I-IN
DO 12 J=I,IB
12 IW=IW+MA(J)
II=II+1
13 MA(II)=IW
DO 14 I=1,II
14 MA(II+I)=-(MA(I)+1)
IJ=2*I
WRITE(6,15)
```

```

15 FORMAT(19H1PATTERNS GENERATED//2(7H NUMBER,8X,
18H PATTERN,5X,3H OR,2X))
 DO 16 I=1,IJ,2
 J=I+1
16 WRITE(6,17)I,MA(I),MA(I),J,MA(J),MA(J)
17 FORMAT(2(I7,I16,Z10))
C*****READING SEQUENCE GENERATION
 NBC=NR*IJ
 DO 30 I=1,NF
30 JF(I)=I
 WRITE(6,66)
 DO 60 J=1,NBC
 DO 31 K=1,NF
31 MAD(K)=K+IFNM
 DO 50 I=1,NF
 JFA=JF(I)
 JA(J,I)=MAD(JFA)
 IF(I,EQ,JFA) GO TO 40
 JFI=I+1
 DO 39 M=JFI,JFA
 MFI=JFA-M+JFI
39 MAD(MFI)=MAD(MFI-1)
40 IF(JFA-NF)42,41,41
41 JF(I)=I
 GO TO 50
42 JF(I)=JFA+1
50 CONTINUE
60 WRITE(6,65)J,(JA(J,J),JJ=1,NF)
65 FORMAT(15,6X,10I3)
66 FORMAT(17H1READING SEQUENCE//7H NUMBER,10X,5HFILES)
C*****WRITING FILES
 NWC=NWB+3
 MERR=0
 INDE=0
 ICN=-1
 DO 210 I=IFNN,NFI
210 REWIND I
 DO 805 I=IFNN,NFI
 LFA(1)=I
 DO 800 K=1,NR
 LFA(2)=K
 DO 800 J=1,IJ
 LFA(3)=J
 DO 701 M=4,NWC
701 LFA(M)=MA(J)
800 WRITE(I)(LFA(M),M=1,NWC)
 ENDFILE I
 WRITE(6,804)I
804 FORMAT(5H0FILE,I3,2X,8H WRITTEN)
805 REWIND I
C*****READING & COMPARING FILES
 DO 852 KK=1,NRD
 DO 850 K=1,NR
 LFA(2)=K
 DO 850 J=1,IJ
 LFA(3)=J
 KJ=J+IJ-(K-1)
 DO 810 M=4,NWC
810 LFA(M)=MA(J)
 DO 850 L=1,NF
 I=JA(KJ,L)
 LFA(1)=I
 IRP=0

```

```
813 IERR=0
    ICN=ICN+1
    READ(I)(LIS(M),M=1,NWC)
814 DO 819 M=1,NWC
    IF(LFA(M)-LIS(M))815,819,815
815 IERR=IERR+1
    LERR(IERR)=M
819 CONTINUE
    IF(IERR)820,828,820
820 WRITE(6,821)I,KJ,J,I,K,J,NWC,MA(J)
821 FORMAT(5H0FILE,I3,2X,17H READING SEQUENCE,I4,2X,
    18H PATTERN,I4,/17H WORD 1 SHOULD BE,I14/
    217H WORD 2 SHOULD BE,I14/17H WORD 3 SHOULD BE,
    3I14/11H WORDS 4 TO,I4/10H SHOULD BE,I21//)
    MERR=MERR+IERR
    IF(MERR-8*NWB)822,860,860
822 DO 824 NN=1,IERR
    NM=LERR(NN)
    WRITE(6,823) NM,LIS(NM)
823 FORMAT(5H WORD,I4,2X,4H WAS,I16)
824 CONTINUE
825 IRP=(IRP+1
    IF(IRP-5)826,826,840
826 WRITE(6,827)IRP
827 FORMAT(21H BACKSPACE AND REPEAT,I3)
    BACKSPACE I
    GO TO 813
828 IF(IRP)840,840,830
830 WRITE(6,831)
831 FORMAT(10H REPEAT OK)
    GO TO 825
840 IF(ICN)850,841,850
841 WRITE(6,842)
842 FORMAT(19H1CHECK OF FAIL TEST)
    LIS(4) = 1234
    LIS(6)=4321
    INDE=2
    GO TO 814
850 CONTINUE
    DO 851 IK=1,FNN,NFI
851 REWIND IK
852 WRITE(6,853)KK
853 FORMAT(17H END OF READ PASS,I4)
    WRITE(6,855)
855 FORMAT(///12H END OF TEST)
    MERR=MERR-INDE
    IBC=(NWB+3)*NB*NBC
    WRITE(6,858)NF,IBC
    WRITE(6,859)NRD
858 FORMAT(I4,6H FILES,8H EACH OF,
    118,22H BITS WRITTEN AND READ)
859 FORMAT(11H FILES READ,I4,6H TIMES)
860 WRITE(6,865)MERR
865 FORMAT(18,7H ERRORS)
    STOP
END
```

Результаты корректной обработки программы

(NB = 32; NF = 10; IFNN = 10; NR = 4; NWB = 397; NRD = 4)

PATTERNS GENERATED

NUMBER	PATTERN	OR	NUMBER	PATTERN	OR
1	0	00000000	2	1	00000001
3	2	00000002	4	4	00000004
5	8	00000008	6	16	00000010
7	32	00000020	8	64	00000040
9	128	00000080	10	256	00000100
11	512	00000200	12	1024	00000400
13	2048	00000800	14	4096	00001000
15	8192	00002000	16	16384	00004000
17	32768	00008000	18	65536	00010000
19	131072	00020000	20	262144	00040000
21	524288	00080000	22	1048576	00100000
23	2097152	00200000	24	4194304	00400000
25	8388608	00800000	26	16777216	01000000
27	33554432	02000000	28	67108864	04000000
29	134217728	08000000	30	268435456	10000000
31	536870912	20000000	32	1073741824	40000000
33	1	00000001	34	5	00000005
35	21	00000015	36	85	00000055
37	341	00000155	38	1365	00000555
39	5461	00001555	40	21845	00005555
41	87381	00015555	42	349525	00055555
43	1398101	00155555	44	5592405	00555555
45	22369621	01555555	46	89478485	05555555
47	357913941	15555555	48	1431655765	55555555
49	3	00000003	50	51	00000033
51	819	00000333	52	13107	00003333
53	209715	00033333	54	3355443	00333333
55	53687091	03333333	56	858993459	33333333
57	7	00000007	58	455	000001C7
59	29127	0000071C7	60	1864135	001C71C7
61	119304647	071C71C7	62	15	0000000F
63	3855	00000F0F	64	986895	000F0F0F
65	252645135	0FOFOFOF	66	31	0000001F
67	31775	000007C1F	68	32537631	01F07C1F
69	63	0000003F	70	258111	0003F03F
71	127	0000007F	72	2080895	001FC07F
73	255	000000FF	74	16711935	00FF00FF
75	511	000001FF	76	1023	000003FF
77	2047	000007FF	78	4095	00000FFF
79	8191	00001FFF	80	16383	00003FFF
81	32767	00007FFF	82	65535	0000FFFF
83	-1	FFFFFFFFFF	84	-2	FFFFFFFE
85	-3	FFFFFFFFFFD	86	-5	FFFFFFFB
87	-9	FFFFFFFFFF7	88	-17	FFFFFFEF
89	-33	FFFFFFFFFFDF	90	-65	FFFFFFBF
91	-129	FFFFFFFFFF7F	92	-257	FFFFFFFF
93	-513	FFFFFFFFFFDF	94	-1025	FFFFFBFF
95	-2049	FFFFFFFFFF7F	96	-4097	FFFFFEFF
97	-8193	FFFFFFFFFFDF	98	-16385	FFFFBFFF
99	-32769	FFFFFFFFFF7FFF	100	-65537	FFFEFFFF
101	-131073	FFFFFFFFFFDF	102	-262145	FFFBFFFF
103	-524289	FFF7FFFFFF	104	-1048577	FFEFFFFF
105	-2097153	FFDFFFFFFF	106	-4194305	FFBFFFFF
107	-8388609	FF7FFFFFFF	108	-16777217	FEFFFFFF
109	-33554433	FDFFFFFFFF	110	-67108865	F8FFFFFF
111	-134217729	F7FFFFFFF	112	-268435457	EFFFFFFF

113	-536870913	DDDDDDDD	114	-1073741825	BFFFFFFF
115	-2	FFFFFFFE	116	-6	FFFFFFFA
117	-22	FFFFFEAA	118	-86	FFFFFAAA
119	-342	FFFFEAAA	120	-1366	FFFFFAAA
121	-5462	FFFEEAAA	122	-21846	FFFAAAAA
123	-87382	FFEAAAAA	124	-349526	FFFAAAAAA
125	-1398102	FFEAAAAA	126	-5592406	FFAAAAAA
127	-22369622	FEAAAAAA	128	-89478486	FAAAAAAA
129	-357913942	EAAAAAAA	130	-1431655766	AAAAAAA
131	-4	FFFFFFFC	132	-52	FFFFFCCC
133	-820	FFFFFCCC	134	-13108	FFFFCCCC
135	-209716	FFFCCCCC	136	-3355444	FFCCCCCC
137	-53687092	FCCCCCCC	138	-858993460	CCCCCCCC
139	-8	FFFFFFF8	140	-456	FFFFFE38
141	-29128	FFFF8E38	142	-1864136	FFE38E38
143	-119304648	F8E38E38	144	-16	FFFFFFF0
145	-3856	FFFFFOFO	146	-986896	FFF0FOFO
147	-252645136	F0FOFOFO	148	-32	FFFFFE0
149	-31776	FFFF83E0	150	-32537632	FE0F83E0
151	-64	FFFFFFC0	152	-258112	FFFC0FC0
153	-128	FFFFFF80	154	-2080896	FFE03F80
155	-256	FFFFFF00	156	-16711936	FFFOFF00
157	-512	FFFFFE00	158	-1024	FFFFFC00
159	-2048	FFFFFB00	160	-4096	FFFFF000
161	-8192	FFFFE000	162	-16384	FFFFC000
163	-32768	FFFF8000	164	-65536	FFFF0000

READING SEQUENCE

NUMBER	FILES
1	10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
2	11 12 13 14 15 16 17 18 19 10
3	12 13 14 15 16 17 18 19 10 11
4	13 14 15 16 17 18 19 10 12 11
5	14 15 16 17 18 19 10 12 11 13
6	15 16 17 18 19 10 12 14 13 11
7	16 17 18 19 10 12 14 11 13 15
8	17 18 19 10 12 14 16 13 15 11
9	18 19 10 12 14 16 11 17 13 15
10	19 10 12 14 16 18 13 11 17 15
11	10 12 14 16 18 11 17 15 13 19
12	11 13 15 17 19 12 18 16 14 10
13	12 14 16 18 10 15 11 13 17 19
14	13 15 17 19 11 16 12 14 18 10
15	14 16 18 10 13 19 15 17 11 12
16	15 17 19 11 14 10 18 12 16 13
17	16 18 10 13 17 12 11 15 14 19
18	17 19 11 14 18 13 12 16 15 10
19	18 10 13 16 11 17 15 12 14 19
20	19 11 14 17 12 18 16 13 15 10
21	10 13 16 19 14 11 12 18 15 17
22	11 14 17 10 16 13 15 12 19 18
23	12 15 18 11 17 14 16 13 10 19
24	13 16 19 12 18 15 17 14 11 10
25	14 17 10 15 11 19 12 13 16 18
26	15 18 11 16 12 10 14 17 19 13
27	16 19 12 17 13 11 15 18 10 14
28	17 10 14 19 15 13 18 11 16 12
29	18 11 15 10 17 16 12 14 13 19
30	19 12 16 11 18 17 13 15 14 10
31	10 14 18 13 11 12 17 15 16 19
32	11 15 19 14 12 13 18 16 17 10

33 12 16 10 17 14 15 11 19 13 18
34 13 17 11 18 15 16 12 10 19 14
35 14 18 12 19 16 17 13 11 10 15
36 15 19 13 10 18 11 17 16 14 12
37 16 10 15 12 11 14 13 17 18 19
38 17 11 16 13 12 15 14 18 19 10
39 18 12 17 14 13 16 15 19 10 11
40 19 13 18 15 14 17 16 10 12 11
41 10 15 11 18 17 12 13 16 14 19
42 11 16 12 19 18 13 14 17 15 10
43 12 17 13 10 11 16 18 14 15 19
44 13 18 14 11 12 17 19 15 16 10
45 14 19 15 12 13 18 10 17 11 16
46 15 10 17 14 16 11 13 12 19 18
47 16 11 18 15 17 12 14 13 10 19
48 17 12 19 16 18 13 15 14 11 10
49 18 13 10 19 11 16 12 14 15 17
50 19 14 11 10 13 18 15 16 17 12
51 10 16 13 12 15 11 18 19 14 17
52 11 17 14 13 16 12 19 10 18 15
53 12 18 15 14 17 13 10 16 11 19
54 13 19 16 15 18 14 11 17 12 10
55 14 10 18 17 11 19 15 12 13 16
56 15 11 19 18 12 10 17 14 16 13
57 16 12 10 11 15 14 13 19 17 18
58 17 13 11 12 16 15 14 10 19 18
59 18 14 12 13 17 16 15 11 10 19
.
.
.
.
.
etc.
to
.

640 19 10 18 13 15 17 16 11 14 12
641 10 12 11 16 18 13 14 17 15 19
642 11 13 12 17 19 14 15 18 16 10
643 12 14 13 18 10 16 17 11 15 19
644 13 15 14 19 11 17 18 12 16 10
645 14 16 15 10 13 19 11 18 12 17
646 15 17 16 11 14 10 13 12 19 18
647 16 18 17 12 15 11 14 13 10 19
648 17 19 18 13 16 12 15 14 11 10
649 18 10 11 16 12 17 13 14 15 19
650 19 11 12 17 13 18 14 15 16 10
651 10 13 14 19 15 11 17 18 12 16
652 11 14 15 10 17 13 19 12 18 16
653 12 15 16 11 18 14 10 17 13 19
654 13 16 17 12 19 15 11 18 14 10
655 14 17 18 13 10 19 15 11 12 16
656 15 18 19 14 11 10 17 13 16 12

FILE 10 WRITTEN

FILE 11 WRITTEN

FILE 12 WRITTEN

FILE 13 WRITTEN

FILE 14 WRITTEN

FILE 15 WRITTEN

FILE 16 WRITTEN

FILE 17 WRITTEN

FILE 18 WRITTEN

FILE 19 WRITTEN

CHECK OF FAIL TEST

FILE 10 READING SEQUENCE 1 PATTERN 1

WORD 1 SHOULD BE	10
WORD 2 SHOULD BE	1
WORD 3 SHOULD BE	1
WORDS 4 TO 400	
SHOULD BE	0

WORD 4 WAS	1234
WORD 6 WAS	4321

BACKSPACE AND REPEAT 1

REPEAT OK

BACKSPACE AND REPEAT 2

REPEAT OK

BACKSPACE AND REPEAT 3

REPEAT OK

BACKSPACE AND REPEAT 4

REPEAT OK

BACKSPACE AND REPEAT 5

REPEAT OK

END OF READ PASS 1

END OF READ PASS 2

END OF READ PASS 3

END OF READ PASS 4

END OF TEST

10 FILES EACH OF 8396800 BITS WRITTEN AND READ

FILES READ 4 TIMES

0 ERRORS

FODK02 – тест накопителя на магнитных дисках или

FOMT00 – тест накопителя на магнитных лентах

Назначение. Программа предназначена для проверки одного накопителя на магнитных дисках, барабанах или магнитных лентах с использованием бесформатного двоичного файла.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взята ULCC-программа).

Описание. Программа создает файл на внешнем устройстве, состоящий из заданного числа блоков фиксированной длины, причем каждый блок состоит из записей длиной в целое слово, в которых записаны двоичные целые числа (например, при длине блока 500 слов записями первого блока являются целые числа от 0 до 499, второго блока – целые числа от 500 до 999 и т.д.). Затем магнитная лента перематывается к началу файла, производится считывание файла и сравнение полученных данных с эталоном. Эти операции повторяются заданное число раз. При несовпадении считанных данных и эталона печатается соответствующее сообщение. При обнаружении 100 несовпадений в одном цикле считывания-сравнения (обычно такая ситуа-

ция не возникает) цикл заканчивается. При выполнении следующих циклов завершение цикла происходит после обнаружения первой же ошибки. Для проверки корректности сообщений об ошибках, принудительно вводится ошибка после считывания первого блока (см. "Результаты корректной обработки программы").

Переменные. NB определяет число записываемых блоков; NC задает длину блока в словах; NP определяет число циклов считывания-сравнения.

Размерность массива IA должна быть не меньше значения переменной NC.

Время выполнения. При проверке накопителей на магнитных дисках время обращения к устройству оценивается по формуле

$$(NP + 1) \cdot NB \cdot R,$$

где R – период вращения диска или число, кратное периоду, но большее процессорного времени, затрачиваемого на запись одного блока.

При проверке накопителей на магнитных лентах время обращения к устройству оценивается иначе:

$$(NP + 1) \cdot [NB \cdot (T + S) + RW] + процессорное время,$$

где T – время продвижения магнитной ленты на один блок; S – время запуска и останова лентопротяжного механизма; RW – время перемотки ленты к началу.

В обоих случаях предполагается, что принятый в системе коэффициент блокирования равен значению переменной NC.

Процессорное время, требуемое для выполнения программы, пропорционально величине $(NP + 1) \cdot NC \cdot NB$. Так же как и для программы FODK01, эти затраты могут быть довольно значительны, о чем свидетельствует приведенный ниже пример. Время работы накопителя на магнитных лентах можно уменьшить с помощью применения оптимизирующего компилятора, что позволяет также значительно сократить затраты процессорного времени.

Значения параметров, при которых для выполнения программы в однопрограммном режиме на вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуется 15 мин:

а) проверка накопителя на магнитных дисках с периодом вращения диска 16,7 мс:

NB = 3000; NC = 500; NP = 7 (процессорное время 12 мин);

б) проверка накопителя на магнитных лентах со скоростью движения ленты 18,75 см/с и плотностью записи 64 бит/мм:

NB = 6000; NC = 500; NP = 2 (процессорное время 9 мин).

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. При малой длине машинного слова необходимо проверить, не возникнет ли переполнение при вычислениях значения I-NC, где I изменяется от 1 до NB.

Текст программы FOMT00/FODK02

```
DIMENSION IA(500)
REWIND 10
IERR=0
WRITE(6,10)
10 FORMAT(1H1,23H MAGNETIC TAPE UNIT TEST)
C*****PARAMETERS*****
NB=1000
NC=500
NP=2
C*****PARAMETERS*****
C*****WRITE
DO 200 I=1,NB
JJ=I*NC-NC
DO 100 J=1,NC
100 IA(J)=J+JJ
```

```

200 WRITE(10) (IA(K),K=1,NC)
    WRITE(6,300)
300 FORMAT(13H TAPE WRITTEN)
    END FILE 10
    REWIND 10
C*****READ & COMPARE
    DO 700 I=1,NP
    DO 600 J=1,NB
        JJ=J+NC-NC
        READ(10) (IA(K),K=1,NC)
400 DO 570 L=1,NC
        IB=L+JJ
        IF(IA(L).EQ.IB) GO TO 570
        WRITE(6,550)I,J,L,IA(L),IB
550 FORMAT(10H READ PASS,I4,2X,5H BLOCK,I4,2X,4H WORD,
           114,2X,3HWAS,I10,2X,9H SHOULD BE,I10)
        IERR=IERR+1
        IF(IERR-100)570,560,560
560 REWIND 10
    GO TO 700
570 CONTINUE
        IF(IB+I-IERR-NC-1)600,580,600
580 WRITE(6,585)
585 FORMAT(19H CHECK OF FAIL TEST)
        IA(1)=999
        GO TO 400
600 CONTINUE
    REWIND 10
    WRITE(6,650)I
650 FORMAT(1H ,16H END OF READ PASS,I4)
700 CONTINUE
    STOP
END

```

Результаты корректной обработки программы

```

MAGNETIC TAPE UNIT TEST
TAPE WRITTEN
CHECK OF FAIL TEST
READ PASS   1   BLOCK   1   WORD   1   WAS      999   SHOULD BE
END OF READ PASS      1
END OF READ PASS      2

```

**FODK03 – тест накопителя на магнитных дисках или
FOMT02 – тест накопителя на магнитных лентах**

Назначение. Программа предназначена для проверки одного накопителя на магнитных дисках или лентах с использованием форматированного файла, содержащего все символы.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взята программа проверки накопителей на магнитных лентах, созданная фирмой ICL для системы 1900).

Описание. Программа создает для проверки четыре типа комбинаций символов:

- 1) получаемых из исходной последовательности символов циклическим сдвигом (см. "Результаты корректной обработки программы" программы FOLP00);
- 2) заданной длины, состоящие из одинаковых символов (для каждого символа);
- 3) односимвольных, содержащих каждый символ;
- 4) расширяющихся, подобных комбинациям первого типа, но имеющих переменную длину, возрастающую от 1 до значения переменной NCH.

Основной цикл программы: запись трех блоков, -перемотка магнитной ленты к началу первого из них, считывание и проверка этих блоков – выполняется до тех

пор, пока не будут записаны и проверены все комбинации. Затем лента перематывается к началу и вся информация считается от начала до конца заданное число раз. Во время считывания записи сравниваются с эталоном, при обнаружении любой ошибки печатается соответствующее сообщение. Для проверки корректности сообщений об ошибках после считывания первой записи принудительно вводится ошибка (см. "Результаты корректной обработки программы").

Переменные. Параметры и множество символов вводятся с перфокарт. *Содержание перфокарты 1:*

Номера колонок	Значения переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, считываемого с перфокарты 2 (например 64)
3 – 5	NCHBL – максимальная длина блока (например, 160). Если длина блока больше 160, следует изменить размерности массивов и предложения FORMAT
6 – 7	NWRP – число повторений цикла запись-считывание всех комбинаций (например, 02)
8 – 9	NMTU – логический номер, присвоенный накопителю на магнитных дисках или лентах (например, 10)
10 – 11	NRD – число повторений считывания ленты (например, 02). Если NRD = 02, то после цикла записи-считывания лента считывается в 1 раз

Содержание перфокарты 2. Отперфорированы все символы. Число символов определяется значением переменной NCH на перфокарте 1.

Время выполнения. Время выполнения программы проще всего установить опытным путем, поскольку обратная перемотка ленты при записи обычно приводит в системе к большим накладным расходам по закрытию и открытию файлов. Иногда эта ситуация может быть использована для проверки системного диска.

Число блоков, записанных на внешнем устройстве (печатается в конце программы после слов BLOCKS WRITTEN), равно

$$3 \cdot (3 \cdot NCH + NCHBL) \cdot NWRP.$$

Для проверки накопителя на магнитных дисках затраты времени определяются по формуле $(NRD + 1) \times$ число записанных блоков $\times R +$ накладные расходы, где R – число, кратное периоду вращения диска, но большее, чем затраты процессорного времени на вывод одного блока.

Затраты времени при проверке накопителей на магнитных лентах зависят от скорости движения ленты, времени запуска и останова лентопротяжного механизма, времени реверсирования направления передачи данных, средней длины блока, времени перемотки ленты к началу, затрат процессорного времени. Эксплуатация программы показывает, что точно определить время выполнения программы можно только опытным путем.

Значения параметров, при которых для выполнения программы в однопрограммном режиме на вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с и накопителем на магнитных лентах (скорость движения ленты 18,75 см/с, плотность записи 64 бит/мм) необходимо 15 мин:

$$NCH = 64; \quad NCHBL = 100; \quad NWRP = 10; \quad NRD = 2 \quad (\text{процессорное время } 3 \text{ мин}).$$

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. В некоторых системах нельзя употреблять оператор BACKSPACE, т.е. программа неприменима вообще. В других системах, где обратная перемотка ленты при записи вызывает закрытие файла, может быть быстро достигнуто ограничение на число файлов, управляемых одной программой (например, 32), и выполнение программы будет прекращено. Для преодоления этой ситуации создана вторая версия програм-

мы (см. пример изменений, приведенный ниже), в которой сначала файл записывается полностью, а затем обратная перемотка ленты производится при считывании.

Отметим, что некоторые поставщики вычислительной техники отказываются использовать эту программу, считая, что она приводит к поломкам устройств.

Текст программы FOMT02/FODK03

```
C      THIS IS FOMT02
      DIMENSION LSB(300),LSC(160)
C*****READ PARAMETERS FROM DATA CARDS
      READ(5,100)NCH,NCHBL,NWRP,NMTU,NRD
      100 FORMAT(I2,13,3I2)
          READ(5,101)(LSB(J),J=1,NCH)
      101 FORMAT(80A1)
C*****READ PARAMETERS FROM DATA CARDS
      WRITE(6,110)
      110 FORMAT(24H1MAGNETIC TAPE UNIT TEST)
          REWIND NMTU
          IERR=0
          IM=300-NCH
      120 FORMAT(160A1)
          DO 150 I=1,IM
      150 LSB(NCH+I)=LSB(I)
          DO 750 M=1,NRD
          NCT=0
          DO 700 MM=1,NWRP
              II=NCHBL
C      RIPPLE PATTERN
          N=NCHBL-1
          DO 200 J=1,NCH
              N=N+1
              IF(M.GT.1) GO TO 180
              WRITE(NMTU,120)(LSB(K),K=J,N)
              WRITE(NMTU,120)(LSB(K),K=J,N)
              WRITE(NMTU,120)(LSB(K),K=J,N)
              BACKSPACE NMTU
              BACKSPACE NMTU
              BACKSPACE NMTU
      180 NCT=NCT+3
          CALL RDMDT(NMTU,NCT,LSB,J,N,IERR,M,NCHBL,II)
      200 CONTINUE
C      BLOCKS SAME CHARA.
          DO 300 J=1,NCH
          DO 250 I=1,NCHBL
      250 LSC(I)=LSB(J)
          IF(M.GT.1) GO TO 280
          WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,NCHBL)
          WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,NCHBL)
          WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,NCHBL)
          BACKSPACE NMTU
          BACKSPACE NMTU
          BACKSPACE NMTU
      280 NCT=NCT+3
          CALL RDMDT(NMTU,NCT,LSC,1,NCHBL,IERR,M,NCHBL,II)
      300 CONTINUE
C      1 CHARA BLOCKS
          II=1
          DO 400 J=1,NCH
          LSC(1)=LSB(J)
          IF(M.GT.1) GO TO 380
          WRITE(NMTU,330) LSB(J)
          WRITE(NMTU,330) LSB(J)
          WRITE(NMTU,330) LSB(J)
```

```

330 FORMAT(1A1)
BACKSPACE NMTU
BACKSPACE NMTU
BACKSPACE NMTU
380 NCT=NCT+3
CALL RDMT(NMTU,NCT,LSC,1,NCHBL,IERR,M,NCHBL,II)
400 CONTINUE
INCREASING RIPPLE
DO 500 J=1,NCHBL
II=J
LSC(J)=LSB(J)
IF(M.GT.1) GO TO 480
WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,J)
WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,J)
WRITE(NMTU,120)(LSC(K),K=1,J)
BACKSPACE NMTU
BACKSPACE NMTU
BACKSPACE NMTU
480 NCT=NCT+3
CALL RDMT(NMTU,NCT,LSC,1,NCHBL,IERR,M,NCHBL,II)
500 CONTINUE
700 CONTINUE
ENDFILE NMTU
REWIND NMTU
WRITE(6,720)M
720 FORMAT(12H0END OF PASS,I4)
750 CONTINUE
WRITE(6,800)
800 FORMAT(12H0END OF TEST)
WRITE(6,801)NCT,M,IERR
801 FORMAT(8HOTAPE OF,I12,24H BLOCKS WRITTEN AND READ,I4,6H TIMES/
1110,2X,6HERRORS)
STOP
END

SUBROUTINE RDMT(I,NB,LS,J,K,IERR,M,NCHBL,II)
DIMENSION LS(300),LIS(160)
NB=NB-3
DO 300 I=1,3
NB=NB+1
READ(I,100)(LIS(L),L=1,II)
100 FORMAT(160A1)
199 JJ=J-1
DO 220 L=1,NCHBL
JJ=JJ+1
IF(LS(JJ).EQ.LIS(L)) GO TO 220
WRITE(6,201) M,NB
201 FORMAT(29H0COMPARISON FAILURE READ PASS,I4,3X,5HBLOCK,I10//)
WRITE(6,202)(LS(N),N=J,K)
202 FORMAT(10H SHOULD BE,2X,100A1)
WRITE(6,203)(LIS(N),N=1,NCHBL)
203 FORMAT(4H WAS,8X,100A1)
IERR=IERR+1
GO TO 300
220 CONTINUE
NN=1
IF(NB NE NN) GO TO 300
WRITE(6,250)
250 FORMAT(19H0CHECK OF FAIL TEST)
LIS(1)=LS(2)
IERR=IERR-1
GO TO 199
300 CONTINUE
RETURN
END

```

Пример изменений, необходимых для обработки программы в некоторых системах. Ниже приведены изменения, внесенные в программу при создании второй версии и необходимые для преодоления затруднений, связанных с закрытием файлов после обратной перемотки магнитной ленты при считывании. Здесь запись блоков производится без обратной перемотки ленты, и при считывании выполняется следующая последовательность операторов:

```
READ  
READ  
READ  
BACKSPACE  
BACKSPACE  
BACKSPACE  
READ  
READ  
READ
```

К значению переменной NRD добавляется 1 с тем, чтобы при $NRD = 1$ файл считывался дважды. Дальнейшие изменения:

после перфокарты 8 вставить оператор

```
NRD = NRD + 1;
```

в цикле DO 200 J = 1, NCH три оператора BACKSPACE заменить на GO TO 200;

в цикле DO 300 J = 1, NCH три оператора BACKSPACE заменить на GO TO 300;

в цикле DO 400 J = 1, NCH три оператора BACKSPACE заменить на GO TO 400;

в цикле DO 500 J = 1, NCHBL три оператора BACKSPACE заменить на GO TO 500.

В подпрограмме RDMT:

a) после предложения DIMENSION добавить

```
ICV = M  
99 CONTINUE;
```

б) после оператора 300 CONTINUE добавить

```
ICV = ICV - 2  
IF (ICV.NE.0) GO TO 400  
BACKSPACE I  
BACKSPACE I  
BACKSPACE I  
GO TO 99  
400 CONTINUE
```

Результаты корректной обработки программы

MAGNETIC TAPE UNIT TEST

CHECK OF FAIL TEST

COMPARISON FAILURE READ PASS 1 BLOCK 1

SHOULD BE 1234567890QWERTYUIOPASDFGHJKLMNPQRSTUVWXYZ,
WAS 2234567890QWERTYUIOPASDFGHJKLMNPQRSTUVWXYZ,

END OF PASS 1

etc.

END OF TEST

TAPE OF 1006 BLOCKS WRITTEN AND READ 2 TIMES
0 ERRORS

FOLP00 – тест печатающего устройства

Назначение. Программа предназначена для проверки построчно печатающих устройств или подобных им пишущих машинок. Кроме того, программа чрезвычайно полезна для проверки печатающих устройств удаленных терминалов с пакетным режимом обработки, поскольку она может выполняться одновременно с обычной работой пользователя; Отдельные подпрограммы могут быть также использованы для проверки видеодисплеев и пишущих машинок оборудования коллективного пользования.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взяты программы проверки печатающих устройств, применяемые различными поставщиками вычислительной техники).

Описание. Программа создает различные комбинации символов и печатает их. Ниже для пояснения этих комбинаций приводится пример распечатки результатов выполнения программы. Основные части программы:

Подготовительная часть. С перфокарт считываются значения параметров; для облегчения дальнейших проверок в каждой проверяемой позиции печатается ее номер.

Процедура 1. Печать комбинации, считанной с перфокарты 2, – проверяется печать всех символов в каждой позиции; при соответствующем формате перфокарты 2 проверяется одновременное возбуждение всех печатающих молоточков в цепных печатающих устройствах.

Процедура 2. Печать комбинации, считанной с перфокарты 2 с двойным интервалом между строками.

Процедура 3. Печать комбинации, считанной с перфокарты 3.

Процедура 4. Печать строк, состоящих из одинаковых символов (перебираются все символы, считанные с перфокарты 2); в печатающих устройствах с шарообразной головкой проверяется возможность одновременного возбуждения всех молоточков.

Процедура 5. Печать сжимающейся и расширяющейся комбинаций (полная комбинация считывается с перфокарты 2); процедура предназначена для проверки считывания из буфера и испытания печатающего устройства при различных скоростях печатания, если скорость печатания зависит от числа выводимых символов.

Процедура 6. Печать строк, заполненных одинаковыми символами сначала в четных, а затем в нечетных позициях (поочередно перебираются все символы, считанные с перфокарты 2). Процедура предназначена для проверок отсутствия помех, создаваемых друг другу соседними молоточками, или эффекта "подпечатывания" в устройствах с шарообразной головкой.

Процедура 7. Прогоны бумаги до начала новой страницы, пропуск различного числа пустых строк (прогоны бумаги являются хорошим испытанием устройства подачи бумаги).

Процедура 8. Определение символов, управляющих кареткой, и печать коротких строк. В этой процедуре каждый символ, считанный с перфокарты 2, проверяется для управления кареткой. Хотя в языке ФОРТРАН для управления кареткой стандартными являются следующие символы:

1 – прогон на начало следующей страницы;

0 – двойной интервал;

+ – подавление перевода каретки перед новой печатью;

иногда подобные эффекты могут создавать и другие символы.

Переменные. Значения переменныхчитываются с трех перфокарт.

Содержание перфокарты 1.

Число ко- лонок	Значения переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, считываемого с других перфокарт
3 – 5	NCOL – число проверяемых позиций устройства (не более 160)
6 – 7	NPAGE – число строк в странице; обычно равно значению переменной NCH, чтобы напечатать все комбинации
8 – 9	NLOOPS – число повторений процедур программы

Содержание перфокарты 2. Отперфорировано до 80 символов. Их точное число определено значением переменной NCH. Обычно символы следует располагать в той же последовательности, как и на головке или в цепочке печатающего устройства.

Содержание перфокарты 3. Отперфорировано до 80 символов. Их точное число определено значением переменной NCH. Эта последовательность представляет собой самую трудную для обработки комбинацию (например, строку пробелов и нулей для проверки средств сжатия пробелов и нулей в системах передачи данных или комбинацию /*/*/* для проверки распределения помех).

Время выполнения. Время выполнения складывается из времени печати и процессорного времени. Время печати оценивается по формуле

$$\frac{NLOOPS \times \text{число печатаемых строк}}{\text{скорость печати}},$$

где число печатаемых строк равно $46 + 8 \cdot NPAGE + 2 \cdot NCOL + 2 \cdot NCH$. Более точные оценки можно получить, рассматривая время печати комбинаций различных типов. Процессорное время примерно пропорционально числу печатаемых строк, причем для печати 1000 строк в вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуется примерно 10 с процессорного времени.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Версия программы, приведенная ниже, предназначена для проверки печатающих устройств, в которых символ управления кареткой включается в заданное число печатаемых позиций. Если печатающее устройство работает так, что этот символ не входит в число печатаемых символов, в программу следует внести следующие изменения:

- 1) удалить операторы

$NCOL = NCOL - 1$ (перфокарта 25 перед предложением FORMAT с меткой 218)

и

$NCOL = NCOL + 1$ (перфокарта 119 после предложения FORMAT с меткой 627);

- 2) заменить перфокарту 24 оператором
215 WRITE (6,218)(LFC (N), N = 1, NCOL).

Если мощность множества символов больше 80, то изменить перфокарты с данными, предложения считывания и предложения печати для полной проверки несложно. Размерности массивов LFA и LFB должны быть увеличены до значения, равного $4 \times$ число вводимых символов.

В некоторых системах, возможно, потребуется уменьшить значения в предложениях FORMAT с метками 218, 350 и 351 (вместо 160 использовать число, соответствующее действительному числу позиций печатающего устройства, например 132) и соответствующим образом изменить аналогичные числа в предложениях FORMAT с метками 451 и 471.

Текст программы FOLP00

```
DIMENSION LFA(320),LFB(320),LFC(161)
C*****PARAMETERS
  READ(5,100)NCH,NCOL,NPAGE,NLOOPS
  100 FORMAT(12,I3,I2,I2)
  READ(5,200)(LFA(J),J=1,NCH)
  READ(5,200)(LFB(J),J=1,NCH)
  200 FORMAT(80A1)
C*****PARAMETERS
  IM=NCH*3
  DO 250 I=1,IM
    LFA(NCH+I)=LFA(I)
  250 LFB(NCH+I)=LFB(I)
  260 FORMAT(1H1,12HPRINTER TEST)
  DO 750 M=1,NLOOPS
    WRITE(6,260)
```

```

        WRITE(6,210)
210 FORMAT(18H NUMBER OF COLUMNS)
    II=1000
    DO 215 I=1,3
    II=II/10
    DO 216 J=1,NCOL
    IJ=J/II
    IM=IJ/10
    IJ=IJ-IM*10
216 LFC(J)=IJ
215 WRITE(6,218)(LFC(N),N=2,NCOL)
    NCOL=NCOL-1
218 FORMAT(1X,160I1)
350 FORMAT(1H ,160A1)
C   WALLPAPER PATTERN FROM DATA CARD 2
    WRITE(6,260)
    N=NCOL-1
    DO 275 I=1,NPAGE
    N=N+1
275 WRITE(6,350)(LFA(J),J=I,N)
    WRITE(6,260)
    N=N+1
    DO 277 I=1,NPAGE
    N=N-1
    NN=NPAGE+1-I
277 WRITE(6,350)(LFA(J),J=NN,N)
C   WALLPAPER PATTERN FROM DATA CARD 2 – DOUBLE LINE SPACING
    WRITE(6,260)
    N=NCOL-1
    DO 273 I=1,NPAGE
    N=N+1
273 WRITE(6,351)(LFA(J),J=I,N)
351 FORMAT(1H0,160A1)
C   WALLPAPER PATTERN FROM DATA CARD 3
    WRITE(6,260)
    N=NCOL-1
    DO 278 I=1,NPAGE
    N=N+1
278 WRITE(6,350)(LFB(J),J=I,N)
    WRITE(6,260)
    N=N+1
    DO 279 I=1,NPAGE
    N=N-1
    NN=NPAGE+1-I
279 WRITE(6,350)(LFB(J),J=NN,N)
C   ONE FULL LINE EACH CHARACTER FROM DATA CARD 2
    WRITE(6,260)
    DO 355 J=1,NPAGE
    DO 400 I=1,NCOL
400 LFC(I)=LFA(J)
355 WRITE(6,350)(LFC(N),N=1,NCOL)
C   DECREASING THEN INCREASING WALLPAPER PATTERN FROM DATA CARD 2
    WRITE(6,260)
    DO 500 I=1,NCOL
500 WRITE(6,350)(LFA(J),J=I,NCOL)
    NM=NCOL+1
    DO 501 I=1,NCOL
    NM=NM-1
501 WRITE(6,350)(LFA(J),J=NM,NCOL)
C   ONE FULL LINE OF EACH CHARACTER IN ODD COLS THEN EVEN COLS.
C   FROM DATA CARD 2
    WRITE(6,260)
    NCL=NCOL/2

```

```
DO 450 J=1,NPAGE
DO 460 I=1,NCL
460 LFC(I)=LFA(J)
450 WRITE(6,451)(LFC(N),N=1,NCL)
451 FORMAT(1H ,80(1X,1A1))
DO 470 J=1,NPAGE
DO 480 I=1,NCL
480 LFC(I)=LFA(J)
470 WRITE(6,471)(LFC(N),N=1,NCL)
471 FORMAT(80(1X,1A1))
THROWS TO TOP OF FORM AND VARIOUS LINE SPACES
DO 560 I=1,5
WRITE(6,260)
WRITE(6,561)
561 FORMAT(1H+,13X,26H LONG THROW TO HEAD OF FORM,1X,
127HAND L N S A I G S P R S E )
560 WRITE(6,562)
562 FORMAT(1H+,45X,22HI E P C N U P E S D)
DO 570 I=1,4
570 WRITE(6,571)
571 FORMAT(15H ONE LINE SPACE)
WRITE(6,580)
580 FORMAT(16H0TWO LINE SPACES//16H TWO LINE SPACES//16H TWO LINE SPAC
1ES//16H TWO LINE SPACES)
DO 590 I=1,4
590 WRITE(6,591)
591 FORMAT(//18H THREE LINE SPACES)
DO 600 I=1,4
600 WRITE(6,601)
601 FORMAT(///17H FOUR LINE SPACES)
DO 610 I=1,2
610 WRITE(6,611)
611 FORMAT(///17H FIVE LINE SPACES////17H FIVE LINE SPACES)
FIND THE SPACING CONTROL CHARS AND PRINTING IN COL 1
DO 620 J=1,NCH
DO 625 I=1,10
625 LFC(I)=LFA(J)
DO 620 K=1,2
WRITE(6,626)
620 WRITE(6,627)(LFC(N),N=1,10)
626 FORMAT(2H00)
627 FORMAT(10A1)
NCOL=NCOL+1
WRITE(6,630)NCH,NCOL,NPAGE,NLOOPS
630 FORMAT(25H1NUMBER OF CHARACTERS WAS,I3/22H NUMBER OF COLUMNS WAS,I
16/25H NUMBER OF LINES/PAGE WAS,I3/20H NUMBER OF LOOPS WAS,I5)
WRITE(6,640)(LFA(J),J=1,NCH)
WRITE(6,641)(LFB(J),J=1,NCH)
640 FORMAT(22H0DATA INPUT TO LFA WAS/1H ,80A1)
641 FORMAT(22H0DATA INPUT TO LFB WAS/1H ,80A1)
643 FORMAT(//7H END OF,I4,24H LOOP(S) OF PRINTER TEST)
WRITE(6,643) M
750 CONTINUE
WRITE(6,650)
650 FORMAT(//20H END OF PRINTER TEST)
STOP
END
```

Пример результатов корректной обработки программы

NCH = 25; NCOL.= 30; NPAGE = 10; NLOOPS = 1

PRINTER TEST
NUMBER OF COLUMNS
00000000000000000000000000000000
0000000111111112222222223
23456789012345678901234567890

ROUTINE 1 – WALLPAPER PATTERN

PRINTER TEST
1234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345
34567890 ABCDEFGHIJKLMNOP123456
4567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567
567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345678
67890 ABCDEFGHIJKLMNOP123456789
7890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
90 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 A
0 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 AB

PRINTER TEST
0 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 AB
90 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 A
890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
7890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
67890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345678
4567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567
34567890 ABCDEFGHIJKLMNOP123456
234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345
1234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234

ROUTINE 2 – WALLPAPER PATTERN – DOUBLE LINE SPACING

PRINTER TEST
1234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345
34567890 ABCDEFGHIJKLMNOP123456
4567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567
567890 ABCDEFGHIJKLMNOP12345678
67890 ABCDEFGHIJKLMNOP123456789
7890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890
90 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 A
0 ABCDEFGHIJKLMNOP1234567890 AB

ROUTINE 3 – WALLPAPER PATTERN FROM DATA CARD 3

PRINTER TEST
THIS IS A FUNNY PATTERN THIS

HIS IS A FUNNY PATTERN THIS
IS IS A FUNNY PATTERN THIS I
S IS A FUNNY PATTERN THIS IS
IS A FUNNY PATTERN THIS IS
IS A FUNNY PATTERN THIS IS A
S A FUNNY PATTERN THIS IS A F
A FUNNY PATTERN THIS IS A FU
FUNNY PATTERN THIS IS A FUN

PRINTER TEST

FUNNY PATTERN THIS IS A FUN
A FUNNY PATTERN THIS IS A FU
A FUNNY PATTERN THIS IS A F
S A FUNNY PATTERN THIS IS A
IS A FUNNY PATTERN THIS IS A
IS A FUNNY PATTERN THIS IS
S IS A FUNNY PATTERN THIS IS
IS IS A FUNNY PATTERN THIS I
HIS IS A FUNNY PATTERN THIS
THIS IS A FUNNY PATTERN THIS

ROUTINE 4 – ONE LINE OF EACH CHARACTER

PRINTER TEST

1111111111111111111111111111
2222222222222222222222222222
33333333333333333333333333
44444444444444444444444444
55555555555555555555555555
66666666666666666666666666
77777777777777777777777777
8888888888888888888888888888
9999999999999999999999999999
000000000000000000000000000000

ROUTINE 5 – DECREASING THEN INCREASING WALLPAPER PATTERN

PRINTER TEST

1234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
34567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
4567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
567890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
67890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
7890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
890 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
90 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
0 ABCDEFGHIJKLMNOP1234
ABCDEFHIJKLMNOP1234
BCDEFGHIJKLMNOP1234
CDEFGHIJKLMNOP1234
DEFGHIJKLMNOP1234
EFGHIJKLMNOP1234
FGHIJKLMNOP1234
GHijklmn1234
HIJKLMNOP1234
IJKLMNOP1234
JKLMNOP1234
KLMN1234
LMN1234

MN1234
 N1234
 1234
 234
 34
 4
 4
 34
 234
 1234
N1234
MN1234
LMN1234
KLMN1234
JKLMN1234
IJKLMN1234
HJKLMN1234
GHIJKLMN1234
FGHIJKLMN1234
EFGHIJKLMN1234
DEFGHIJKLMN1234
CDEFGHIJKLMN1234
BCDEFGHIJKLMN1234
ABCDEFGHIJKLMN1234
ABCDEFGHIJKLMN1234
 0 ABCDEFGHIJKLMN1234
 90 ABCDEFGHIJKLMN1234
 890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 7890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 67890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 567890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 4567890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 34567890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 234567890 ABCDEFGHIJKLMN1234
 1234567890 ABCDEFGHIJKLMN1234

ROUTINE 6 – EACH CHARACTER ODD THEN EVEN COLUMNS

PRINTER TEST

```

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9

```

**ROUTINE 7 – LINE SPACING
(EACH REPEATED 4 OR 5 TIMES)**

PRINTER TEST LONG THROW TO HEAD OF FORM AND LINE SPACING SUPPRESSED

ONE LINE SPACE
ONE LINE SPACE

TWO LINE SPACES

THREE LINE SPACES

FOUR LINE SPACES

FIVE LINE SPACES

ROUTINE 8 – CONTROL CHARACTERS

0

111111111

0

111111111

0

222222222

0

222222222

0

333333333

0

333333333

0

444444444

0

444444444

etc.

NUMBER OF CHARACTERS WAS 25
NUMBER OF COLUMNS WAS 30
NUMBER OF LINES/PAGE WAS 10
NUMBER OF LOOPS WAS 1

DATA INPUT TO LFA WAS
1234567890 ABCDEFGHIJKLMNOP

DATA INPUT TO LFB WAS
THIS IS A FUNNY PATTERN

END OF 1 LOOP(S) OF PRINTER TEST

END OF PRINTER TEST

FOCP00 – тест устройства вывода на перфокарты

Назначение. Программа предназначена для проверки устройств вывода на перфокарты. Отперфорированные перфокарты в дальнейшем используются при проверках устройств ввода с перфокарт с помощью теста FOCR00.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взяты программы проверки устройств ввода и вывода на перфокарты, применяемые различными поставщиками вычислительной техники).

Описание. Программа создает различные комбинации символов и выводит их на перфокарты (устройству вывода на перфокарты присвоен номер 7). Ниже описаны составные части программы.

Подготовительная часть. С двух перфокартчитываются значения параметров и всевозможные символы, которыми заполняется массив, выводимый в дальнейшем на перфокарты.

Процедура 1. Вывод на перфокарты циклически сдвигаемой последовательности, содержащей все символы (см. процедуру 1 программы FOLP00). Перфорируются две пачки перфокарт, причем каждый символ перфорируется в каждой колонке дважды.

Процедура 2. Перфорация карт, полностью заполненных каждым символом.

Процедура 3. Каждый символ перфорируется сначала только в последней колонке перфокарты, а затем только в первой (остальное поле перфокарты не перфорируется). В результате выполнения процедуры 3 получаются две пачки перфокарт.

Процедура 4. Сначала каждый символ перфорируется в нечетных, а затем в четных колонках перфокарт. В результате вновь получаются две пачки перфокарт.

Процедура 5. Сокращающаяся и расширяющаяся перфорация. Последовательность символов, выводившаяся на перфокарты в процедуре 1, перфорируется сначала с 1-й колонки по 80-ю, затем со 2-й, с 3-й и т.д. После этого перфокарты с тем же содержанием перфорируются в обратном порядке. В результате перфорируется 160 перфокарт.

После завершения процедуры 5 печатается полное множество перфорировавшихся символов и число отперфорированных перфокарт.

Переменные. Значения переменных вводятся с двух перфокарт.

Содержание перфокарты 1:

Номера колонок	Значение переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, считываемого с перфокарты 2;
3 – 4	NLOOPS – число повторений каждой процедуры программы.

Содержание перфокарты 2. Начиная с первой колонки, отперфорированы все символы, предназначенные для вывода на перфокарты. Число символов равно значению переменной NCH (см. также ограничения, перечисленные в разделе "Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах").

Время выполнения Время выполнения складывается из времени перфорации и процессорного времени. Время перфорации оценивается по формуле

$$\text{NLOOPS} \times \frac{\text{число перфорируемых карт}}{\text{скорость перфорации}},$$

где число перфокарт равно $160 + 7 \cdot NCH$ (например, если мощность множества символов равна 64, то перфорируется 608 перфокарт). Процессорное время примерно пропорционально числу перфокарт, причем для перфорации 600 перфокарт в вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуется около 6 с процессорного времени.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. На последовательность символов, вводимую с перфокарт, могут быть наложены некоторые ограничения, например могут быть запрещены комбинации, соответствующие

концу файла (например, * * * * *) или предложением языка управления заданиями (например, //). Эти комбинации появляются обычно при выполнении процедуры 2, и естественно, что комбинации, обозначающие конец файла, должны быть исключены из множества перфорируемых символов.

Текст программы FOCPP00

```
C      PUNCH TEST
      DIMENSION LFA(400),LFC(80)
C*****PARAMETERS
      READ(5,100)NCH,NLOOPS
  100 FORMAT(2I2)
      READ(5,200)(LFA(J),J=1,NCH)
  200 FORMAT(80A1)
C*****PARAMETERS
      IM=NCH+1
      NCOL=80
      NCOM=NCOL+1
      NCOK=NCOL-1
      DO 250 I=1,IM
  250 LFA(NCH+I)=LFA(I)
      LL=0
      DO 750 M=1,NLOOPS
C      RIPPLE PUNCH
      N=NCOK
      DO 275 I=1,NCH
      N=N+1
  275 WRITE(7,200)(LFA(J),J=I,N)
      N=N+1
      DO 277 I=1,NCH
      N=N-1
      NN=NCH+1-I
  277 WRITE(7,200)(LFA(J),J=NN,N)
C      FULL CARD EACH CHARACTER
      DO 355 J=1,NCH
      DO 400 I=1,NCOL
  400 LFC(I)=LFA(J)
  355 WRITE(7,200)(LFC(N),N=1,NCOL)
C      EACH CHARA. IN LAST THEN FIRST COLUMN REMAINDER BLANK
      DO 450 I=1,NCH
  450 WRITE(7,451) LFA(I)
  451 FORMAT(79X,1A1)
      DO 460 I=1,NCH
  460 WRITE(7,461) LFA(I)
  461 FORMAT(1A1,79X)
C      FULL CARD EACH CHARA ODD THEN EVEN COLUMNS
      NT=NCOL/2
      DO 480 J=1,NCH
      DO 470 I=1,NT
  470 LFC(I)=LFA(J)
      WRITE(7,481)(LFC(N),N=1,NT)
  481 FORMAT(40(1A1,1X))
  480 WRITE(7,482)(LFC(N),N=1,NT)
  482 FORMAT(40(1X,1A1))
C      DECREASING THEN INCREASING RIPPLE
      DO 500 I=1,NCOL
  500 WRITE(7,200)(LFA(J),J=I,NCOL)
      NM=NCOM
      DO 501 I=1,NCOL
      NM=NM-1
  501 WRITE(7,200)(LFA(J),J=NM,NCOL)
  750 LL=LL+1
      LM=LL*(2*NCOL+7*NCH)
      WRITE(6,800)(LFA(I),I=1,NCH)
```

```
800 FORMAT(1H1,10HPUNCH TEST//15H DATA INPUT WAS//  
11X,80A1)  
WRITE(6,900)LM  
900 FORMAT(I10,14H CARDS PUNCHED)  
STOP  
END
```

FOCR00 – тест устройства ввода с перфокарт

Назначение. Программа предназначена для проверки устройств ввода с перфокарт с использованием перфокарт, полученных в результате выполнения программы проверки устройства вывода на перфокарты FOCR00. Программа полезна для проверки устройств ввода с перфокарт удаленных терминалов с пакетным режимом обработки.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взяты программы проверки устройств ввода и вывода на перфокарты, применяемые различными поставщиками вычислительной техники).

Описание. Программа воспроизводит комбинации символов, выводимые на перфорацию программной проверки устройств вывода на перфокарты. Составные части программы:

Процедура 1. Воспроизведение циклически сдвигаемой последовательности, содержащей все символы.

Процедура 2. Воспроизведение комбинаций, соответствующих заполнению каждого символом полной перфокарты.

Процедура 3. Воспроизведение комбинаций, соответствующих перфорации каждого символа сначала в последней, а затем в первой колонке перфокарт (остальные символы комбинаций – пробелы).

Процедура 4. Воспроизведение комбинаций, соответствующих перфорации каждого символа сначала во всех четных, а затем во всех нечетных колонках перфокарт.

Процедура 5. Воспроизведение сокращающейся и расширяющейся комбинаций.

Воспроизведенные комбинации сравниваются с комбинациями, считанными с перфокарт в подпрограмме RCDK; сообщения обо всех несовпадениях печатаются в следующем виде:

CARD 2

SHOULD BE BCDEFGH ...

WAS CDEFGH ...

Наиболее частыми причинами появления сообщений об ошибках при проверке устройств ввода с перфокарт (более частыми, чем неисправности вычислительной машины) являются перестановка местами перфокарт, наличие пустых перфокарт в пачке, потеря перфокарт или появление дополнительных посторонних перфокарт. В каждом из перечисленных случаев предпринимаются попытки восстановления правильной последовательности перфокарт. При перестановке перфокарт на причину несравнения указывает соответствующее сообщение. При обнаружении несовпадения комбинации и содержимого считанной перфокарты проверяется, не является ли перфокарта пустой, и, если она пуста, печатается сообщение

CARD NO 550 BLANK IGNORED.

Затем считывается следующая перфокарта, содержимое которой сравнивается с той же комбинацией. Если перфокарта утеряна или в пачке присутствует дополнительная посторонняя перфокарта, сообщения об ошибке выводятся на печать вплоть до окончания процедуры 1, остальные сообщения печатаются без выполнения сравнения, причем им предшествует сообщение

TOO MANY ERRORS FOLLOWING CARDS READ NOT CHECKED.

Предпринимается попытка восстановить корректную последовательность, и в случае успеха печатается сообщение

CARRY ON READING AND CHECKING.

После обработки каждой группы перфокарт печатается сообщение о числе считанных перфокарт и числе обнаруженных ошибок

CARDS READ 601, 0 ERRORS.

После обработки всех групп перфокарт печатается сообщение

END OF TEST.

Если ошибки обнаружены при обработке последней группы перфокарт, печатается сообщение

EXTRA CARDS FOLLOW,

предпринимается попытка считывания дополнительной тысячи перфокарт и содержимое всех дополнительных перфокарт распечатывается.

Переменные. Значения переменных вводятся с двух перфокарт (так же как и в программе проверки устройств вывода на перфокарты).

Номера колонок	Значение переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, считываемого с перфокарты 2;
3 – 4	NLOOPs – число повторений каждой процедуры программы;
5	IBLK определяет стандартную кодировку пробела не перфокарте.

Содержание перфокарты 2. Начиная с первой колонки, отперфорированы все символы, предназначенные для последующего сравнения. Число символов равно значению переменной NCH. Если эта перфокарта отсутствует, то вместо нее используется первая из следующих далее перфокарт с данными, откуда выбираются первые NCH символов.

После описанных двух перфокарт следуют перфокарты, предназначенные для считывания и сравнения. Число групп таких перфокарт равно значению переменной NLOOPs.

Время выполнения. Время выполнения складывается из времени считывания перфокарт и процессорного времени. Время считывания можно оценить, зная число перфокарт, предназначенных для считывания, и скорость устройства ввода с перфокарт. Процессорное время примерно пропорционально числу вводимых перфокарт, причем для ввода 600 перфокарт в вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуется около 20 с процессорного времени.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. Следует предусмотреть, чтобы перфокарты, полученные при выполнении проверки устройства вывода на перфокарты, не содержали последовательностей символов, приводящих к ошибочному окончанию рассматриваемой программы, например комбинаций, соответствующих концу файла (например, *****) или предложениям языка управления заданиями (например, //). Эти комбинации обычно возникают при выполнении процедуры 2. В случае, когда считывается группа перфокарт с неизвестным заранее содержанием (см. выше содержимое перфокарты 2), карты, соответствующие концу файла, могут быть заменены перфокартами, содержащими, например, следующий текст:

THIS IS A DELIBERATE ERROR.

Текст программы FOCR00

```
C      CARD READER TEST
COMMON LSB,IBLK,ICD,IERR,NCOL
DIMENSION LFA(400),LSB(81)
DIMENSION LCK(80)
C*****PARAMETERS
READ(5,100)NCH,NLOOPs,IBLK
```

```

100 FORMAT(2I2,1A1)
    READ(5,200)(LFA(J),J=1,NCH)
200 FORMAT(80A1)
C*****PARAMETERS
201 FORMAT(1X,80A1)
    IM=NCH*3
    NCOL=80
    NCOM=NCOL+1
    NCOK=NCOL-1
    DO 250 I=1,IM
250 LFA(NCH+I)=LFA(I)
    WRITE(6,255)
255 FORMAT(1H1,11HREADER TEST)
    DO 750 M=1,NLOOPS
    ICD=0
    IERR=0
C     RIPPLE READ
    DO 275 I=1,NCH
    ICD=ICD+1
    DO 274 J=1,NCOL
274 LSB(J)=LFA(I+J-1)
    CALL RDCK
275 CONTINUE
    DO 277 I=1,NCH
    ICD=ICD+1
    DO 276 J=1,NCOL
276 LSB(J)=LFA(NCH+J-1)
    CALL RDCK
277 CONTINUE
C     OUT OF SEQUENCE RECOVERY
    IF(IERR+5-2*NCH)399,300,300
300 WRITE(6,301)
301 FORMAT(26H TOO MANY ERRORS FOLLOWING,
123H CARDS READ NOT CHECKED)
    DO 305 I=1,NCOL,2
    LSB(I)=IBLK
305 LSB(I+1)=LFA(NCH)
    NN=1001
306 DO 310 I=1,NN
    READ(5,200)(LCK(J),J=1,NCOL)
    WRITE(6,201)(LCK(J),J=1,NCOL)
    ICD=ICD+1
    DO 320 J=1,NCOL
    IF(LCK(J)-LSB(J))310,320,310
320 CONTINUE
    GO TO 321
310 CONTINUE
321 IF(NN-1001)323,322,323
322 NN=2*NCOL
    GO TO 306
323 WRITE(6,333)
333 FORMAT(30H CARRY ON READING AND CHECKING)
    GO TO 749
399 CONTINUE
C     FULL CARD EACH CHARACTER
    DO 355 J=1,NCH
    ICD=ICD+1
    DO 400 I=1,NCOL
400 LSB(I)=LFA(J)
    CALL RDCK
355 CONTINUE
C     79 BLANKS EACH CHARA IN LAST OR FIRST COLUMN
    DO 450 I=1,NCH

```

```

        ICD=ICD+1
        DO 449 J=1,NCH
 449  LSB(J)=IBLK
      LSB(NCOL)=LFA(I)
      CALL RDCK
 450  CONTINUE
      DO 460 I=1,NCH
          ICD=ICD+1
          LSB(1)=LFA(I)
          DO 459 J=2,NCOL
 459  LSB(J)=IBLK
      CALL RDCK
 460  CONTINUE
C      FULL CARD EACH CHARA ODD THEN EVEN COLUMNS
      DO 480 I=1,NCH
          ICD=ICD+1
          DO 478 J=1,NCOL,2
              LSB(J)=LFA(I)
 478  LSB(J+1)=IBLK
      CALL RDCK
          ICD=ICD+1
          DO 479 J=1,NCOL,2
              LSB(J)=IBLK
 479  LSB(J+1)=LFA(I)
      CALL RDCK
 480  CONTINUE
C      DECREASING THEN INCREASING RIPPLE
      DO 500 I=1,NCOL
          ICD=ICD+1
          NN=NCOM-1
          DO 498 J=1,NN
 498  LSB(J)=LFA(I+J-1)
          NM=NN+1
          DO 499 J=NM,NCOM
 499  LSB(J)=IBLK
      CALL RDCK
 500  CONTINUE
      DO 501 I=1,NCOL
          ICD=ICD+1
          NN=NCOM-I
          DO 503 J=I,I
 503  LSB(J)=LFA(J+NN-1)
          NM=I+1
          DO 550 J=NM,NCOM
 550  LSB(J)=IBLK
      CALL RDCK
 501  CONTINUE
 749  CONTINUE
      WRITE(6,810)ICD,IERR
 810  FORMAT(16,11H CARDS READ,16,7H ERRORS)
 750  CONTINUE
      WRITE(6,772)
 772  FORMAT(///12H END OF TEST)
      IF(IERR)770,770,771
 771  WRITE(6,773)
 773  FORMAT(///19H EXTRA CARDS FOLLOW///)
      DO 775 I=1,1000
          READ(5,200)(LSB(J),J=1,NCOL)
 775  WRITE(6,201)(LSB(J),J=1,NCOL)
 770  STOP
      END

```

```

C      SUBROUTINE RDCK
      READ CARD AND CHECK
      COMMON LSB,IBLK,ICD,IERR,NCOL
      DIMENSION LIS(80),LSB(81)
100  READ(5,200)(LIS(I),I=1,NCOL)
200  FORMAT(80A1)
      DO 300 J=1,NCOL
         IF(LSB(J)-LIS(J))997,300,997
300  CONTINUE
      GO TO 400
997  DO 350 J=1,NCOL
         IF(LIS(J)-IBLK)999,350,999
350  CONTINUE
993  WRITE(6,992) ICD
992  FORMAT(12H CARD NUMBER,I6,14H BLANK IGNORED)
         ICD=ICD+1
      GO TO 100
999  WRITE(6,998) ICD,(LSB(I),I=1,NCOL)
998  FORMAT(5H CARD,I6/10H SHOULD BE,2X,80A1)
         WRITE(6,888)(LIS(I),I=1,NCOL)
888  FORMAT(4H WAS,8X,80A1)
         IERR=IERR+1
400  RETURN
      END

```

FOTR00 – тест устройства вывода на перфоленту

Назначение. Программа предназначена для проверки устройств вывода на перфоленту. Полученная перфолента используется программой проверки устройств ввода с перфоленты FOTR00.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взята программа проверки устройств ввода и вывода на перфокарты).

Описание. Программа создает различные комбинации символов и выводит их на перфоленту (устройству вывода на перфоленте в программе присвоен номер 7). Программа состоит из следующих основных частей.

Подготовительная часть. С двух перфокарт (или с перфоленты) вводятся значения переменных и различные символы, которыми заполняется массив, предназначенный для дальнейшей перфорации. Кроме того, значения параметров выводятся на перфоленту.

Процедура 1. Вывод на перфоленту циклически сдвигаемой последовательности (см. процедуру 1 программы FOLP00) блоками по 80 символов.

Процедура 2. Перфорация 80-символьных блоков, содержащих одинаковые символы (процедура проводится для каждого символа).

Процедура 3. Перфорация каждого символа (вывод односимвольных блоков).

Процедура 4. Сокращающаяся и расширяющаяся перфорация: вывод блоков различной длины, сначала длина блоков последовательно уменьшается от 80 до 1, а затем вновь возрастает до 80.

Переменные. Значения переменных вводятся с двух перфокарт.

Содержание перфокарты 1:

Номера колонок	Значения переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, считываемого с перфокарты 2;
3 – 4	NLOOP – число повторений каждой процедуры программы
5	IBLK определяет стандартную кодировку пробела на перфоленте или перфокарте

Содержание перфокарты 2. Отперфорированы все символы, предназначенные для вывода на перфоленту. Число символов равно значению переменной NCH (см. также ограничения, перечисленные в разделе "Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах").

Время выполнения. Время выполнения складывается из времени перфорации и процессорного времени. Время перфорации зависит от скорости перфорации и числа выводимых на перфоленту символов, равного NLOOPS ($241 \cdot NCH + 6480$); например, если мощность множества символов равна 64, то перфорируется 21 904 символа. Процессорное время примерно пропорционально числу перфорируемых символов, причем для вывода 22 000 символов в вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуется около 4 с процессорного времени.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. На последовательность символов, вводимую с перфокарт, могут быть наложены некоторые ограничения, например могут быть запрещены комбинации, соответствующие концу файла (например, * * * * *) или предложениям языка управления заданиями (например, //). Эти комбинации появляются обычно при выполнении процедуры 2, и естественно, что комбинации, обозначающие конец файла, должны быть исключены из множества перфорируемых символов.

Текст программы FOTP00

```
C      PUNCH TEST
      DIMENSION LFA(400),LFC(80)
C*****PARAMETERS
      READ(5,100)NCH,NLOOPS,IBLK
 100 FORMAT(2I2,1A1)
      WRITE(7,100)NCH,NLOOPS,IBLK
      READ(5,200)(LFA(J),J=1,NCH)
 200 FORMAT(80A1)
      WRITE(7,200)(LFA(J),J=1,NCH)
C*****PARAMETERS
      IM=NCH*3
      NCOL=80
      NCOM=NCOL+1
      NCOK=NCOL-1
      DO 250 I=1,IM
 250 LFA(NCH+I)=LFA(I)
      LL=0
      DO 750 M=1,NLOOPS
C      RIPPLE PUNCH
      N=NCOK
      DO 275 I=1,NCH
      N=N+1
 275 WRITE(7,200)(LFA(J),J=I,N)
      N=N+1
      DO 277 I=1,NCH
      N=N-1
      NN=NCH+1-I
 277 WRITE(7,200)(LFA(J),J=NN,N)
C      80 CHARA BLOCK OF EACH CHARA
      DO 355 J=1,NCH
      DO 400 I=1,NCOL
 400 LFC(I)=LFA(J)
 355 WRITE(7,200)(LFC(N),N=1,NCOL)
C      1 CHARA BLOCKS OF EACH CHARA
      DO 450 I=1,NCH
 450 WRITE(7,451) LFA(I)
 451 FORMAT(1A1)
C      DECREASING THEN INCREASING RIPPLE
      DO 500 I=1,NCOL
 500 WRITE(7,200)(LFA(J),J=I,NCOL)
```

```

NM=NCOM
DO 501 I=1,NCOL
NM=NM-1
501 WRITE(7,200)(LFA(J),J=NM,NCOL)
750 LL=LL+1
LM=LL*(2*NCOL+4*NCH)
WRITE(6,800)(LFA(I),I=1,NCH)
800 FORMAT(1H1,10HPUNCH TEST//15H DATA INPUT WAS//1X,80A1)
WRITE(6,900)LM
900 FORMAT(I10,15H BLOCKS PUNCHED)
STOP
END

```

FOTR00 – тест устройства ввода с перфоленты

Назначение. Программа предназначена для проверки устройств ввода с перфолентами с использованием перфоленты, полученной в результате выполнения программы проверки устройства вывода на перфоленту FOTR00.

Автор. Р. Лонгботтом, Центральное агентство по вычислительной технике (за основу разработки взяты программы проверки устройств ввода и вывода на перфокарты).

Описание. Программа воспроизводит комбинации символов, выводимые на перфорацию программой проверки устройств вывода на перфоленту, и сравнивает их с комбинациями, считанными с указанной перфоленты (устройству ввода с перфоленты в программе присвоен номер 4). Основные части программы:

Процедура 1. Воспроизведение циклически сдвигаемой последовательности, содержащей все символы.

Процедура 2. Воспроизведение 80-символьных комбинаций, содержащих одинаковые символы (процедура проводится для каждого символа).

Процедура 3. Воспроизведение односимвольных блоков, содержащих каждый символ.

Процедура 4. Воспроизведение сокращающейся и расширяющейся комбинаций.

Подпрограмма считывания. Сравнение комбинаций, считанных с перфоленты и воспроизведенных отдельными процедурами. В случае несравнения печатается следующее сообщение:

BLOCK 17

SHOULD BE ABCDEF

WAS BBCDEF

После окончания очередного выполнения всех процедур печатается число считанных блоков и число обнаруженных ошибок.

Переменные. В программе используются переменные, описанные в программе проверки устройств вывода на перфоленту и выведенные указанной программой в начало перфоленты.

Содержание блока 1.

Номера символов	Значение переменных
1 – 2	NCH – мощность множества символов, составляющих блок 2
3 – 4	NLOOP – число повторений каждой процедуры
5	IBLK определяет кодировку пробела.

Содержание блока 2. Отперфорированы все символы, предназначенные для дальнейшего сравнения. Число символов равно значению переменной NCH. (Эти символы должны быть идентичны первым NCH символам первого блока, который будет считан с продолжения перфоленты.)

После описанных двух блоков следуют группы блоков, предназначенных для считывания и сравнения. Число таких групп блоков равно значению переменной NLOOPS.

Время выполнения. Время выполнения складывается из времени считывания перфоленты и процессорного времени. Время считывания перфоленты можно оценить, зная общее число считываемых символов и быстродействие устройства, однако, если перфолента считывается одновременно с выполнением программы, во внимание может быть также принято время запусков и остановов устройства ввода (такая процедура позволяет лучше проверить устройство). Общее число считываемых символов равно NLOOPS (241·NCH + 6480); например, если мощность множества символов равна 64, считывается 21 904 символа. Процессорное время пропорционально числу считываемых символов, причем для считывания 2200 символов в вычислительной машине с быстродействием процессора 1000 тыс. команд/с требуетсся примерно 15 с процессорного времени.

Изменения, необходимые для обработки программы в различных системах. На последовательность символов, вводимую с перфоленты, могут быть наложены некоторые ограничения (см. описание программы FOTP00).

Текст программы FOTR00

```
C      PAPER TAPE READER TEST
      DIMENSION LFA(400),LSB(81)
      COMMON LSB,IBLK,ICD,IERR,NCOL
C*****PARAMETERS
      READ(4,100)NCH,NLOOPS,IBLK
 100 FORMAT(2I2,1A1)
      READ(4,200)(LFA(I,J),J=1,NCH)
 200 FORMAT(80A1)
C*****PARAMETERS
 201 FORMAT(1X,80A1)
      IM=NCH*3
      NCOL=80
      NCOM=NCOL+1
      DO 250 I=1,IM
 250 LFA(NCH+I)=LFA(I)
      WRITE(6,255)
 255 FORMAT(1H1,11HREADER TEST)
      DO 750 M=1,NLOOPS
      ICD=0
      IERR=0
C      RIPPLE READ
      DO 275 I=1,NCH
      ICD=ICD+1
      DO 274 J=1,NCOL
 274 LSB(J)=LFA(I+J-1)
      CALL RDCK
 275 CONTINUE
      DO 277 I=1,NCH
      ICD=ICD+1
      DO 276 J=1,NCOL
 276 LSB(J)=LFA(NCH+J-I)
      CALL RDCK
 277 CONTINUE
C      80 CHARA BLOCK OF EACH CHARACTER
      DO 355 J=1,NCH
      ICD=ICD+1
      DO 400 I=1,NCOL
 400 LSB(I)=LFA(J)
      CALL RDCK
 355 CONTINUE
C      1 CHARA BLOCK OF EACH CHARA
      DO 460 I=1,NCH
      ICD=ICD+1
```

```

    LSB(1)=LFA(I)
    DO 459 J=2,NCOL
459  LSB(J)=IBLK
     CALL RDCK
460  CONTINUE
C     DECREASING THEN INCREASING RIPPLE
     DO 500 I=1,NCOL
     ICD=ICD+1
     NN=NCOM-I
     DO 498 J=1,NN
498  LSB(J)=LFA(I+J-1)
     NM=NN+1
     DO 499 J=NM,NCOM
499  LSB(J)=IBLK
     CALL RDCK
500  CONTINUE
     DO 501 I=1,NCOL
     ICD=ICD+1
     NN=NCOM-I
     DO 503 J=1,I
503  LSB(J)=LFA(J+NN-1)
     NM=I+1
     DO 550 J=NM,NCOM
550  LSB(J)=IBLK
     CALL RDCK
501  CONTINUE
     WRITE(6,810)ICD,IERR
810  FORMAT(I6,12H BLOCKS READ,I6,7H ERRORS)
750  CONTINUE
     WRITE(6,772)
772  FORMAT(//12H END OF TEST)
770  STOP
     END

```

```

SUBROUTINE RDCK
C     READ BLOCK AND CHECK
      DIMENSION LIS(80),LSB(81)
      COMMON LSB,IBLK,ICD,IERR,NCOL
      DO 50 J=1,NCOL
50  LIS(J)=IBLK
100 READ(4,200)(LIS(I),I=1,NCOL)
200 FORMAT(80A1)
      DO 300 J=1,NCOL
      IF(LSB(J).NE LIS(J)) GO TO 997
300  CONTINUE
      GO TO 400
997 WRITE(6,998)ICD,(LSB(I),I=1,NCOL)
998 FORMAT(6H BLOCK,I6/10H SHOULD BE,2X,80A1)
      WRITE(6,888)(LIS(I),I=1,NCOL)
888 FORMAT(4H WAS,BX,80A1)
      IERR=IERR+1
400 RETURN
     END

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБСЛУЖИВАЕМОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММИРУЕМОГО КАЛЬКУЛЯТОРА

В гл. 12 приведен метод вычисления коэффициентов обслуживаемости подсистем и систем, и в том числе тех, которые содержат в своем составе резервные устройства. Описываемая здесь программа реализует простой способ вычисления и может включать метод весовых коэффициентов для расчета коэффициента обслуживаемости. Текст программы приведен для калькулятора Texas SR52, однако мы также приводим схему программы, чтобы программу можно было преобразовать для выполнения на других программируемых калькуляторах.

Теоретические предпосылки. Для вычисления коэффициента обслуживаемости параллельно соединенных устройств используется биномиальное распределение $(S + U)^N$,

где N – число устройств; S – коэффициент обслуживаемости или вероятность того, что устройство работоспособно; U – коэффициент, обратный коэффициенту обслуживаемости, или вероятность того, что устройство неработоспособно.

Вероятность того, что работоспособны точно Y устройств (или неработоспособны $N - Y$ устройств) равна

$$S(Y) = \frac{N!}{Y!(N-Y)!} S^Y U^{N-Y}.$$

Метод весовых коэффициентов. При использовании метода весовых коэффициентов, когда несколько устройств вышло из строя, но работа продолжается, хотя и с меньшей производительностью, время простоя не игнорируется, а умножается на весовой коэффициент W .

Тогда

Время простоя = Общее время $\times W$;

Время обслуживания пользователей = Общее время $\times (1 - W)$.

Коэффициент обслуживаемости принимается равным

$$S(Y)(1 - W).$$

Работа с калькулятором. Калькулятор SR52 имеет ряд клавишей, семь из которых используются рассматриваемой программой:

- | | | |
|----|---|---------------------|
| A | – ввод численного значения параметра N | (шаг 1); |
| B | – ввод численного значения параметра S | (шаг 2); |
| C | – ввод численного значения весового коэффициента W
(или 0) | (шаг 3 A); |
| D | – ввод численного значения параметра Y | (шаг 4A или
3B); |
| D' | – однократное вычисление величины S(Y) | (шаг 5A); |
| E | – высвечивание результирующего значения S(N → Y) | (шаг 6A или
5B); |
| E | – вычисление результирующего значения S(N → Y)
в цикле | (шаг 4B) |

При однократном вычислении без учета весовых коэффициентов ввести значение N и S (и $W = 0$, если для задано какое-либо другое значение). Затем ввести Y и вычислить поочередно величину $S(Y)$ для каждого значения $Y = N, N - 1, N - 2$ и т.д. Результирующее значение S при необходимости может быть высвеченено после каждого шага вычислений. При вычислениях методом весовых коэффициентов сначала ввести N и S , затем W и Y и вычислить поочередно каждое значение $S(Y)$ при $Y = N, N - 1, N - 2$ и т.д. (а также при необходимости результирующее значение S после каждого шага). При вычислениях в цикле ввести N, S и Y , затем нажать клавишу E для вычисления $S(N) + S(N - 1) + S(N - 2) + \dots$

Результаты высвечиваются в одном из следующих видов:

- | | | |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|
| 1) NYYYS.SSSSS | 2) { или NYYY0 | если S очень мало; |
| или
NYYYS. SSSSSS при N < 10; | { NYY0,
NNYY1 | если S равно или близко к 1,0. |
| | { или NYY1 | |

Полностью (10 цифр) значение $S(Y)$ можно извлечь из регистра 12, а результатирующее значение $S(N \rightarrow Y)$ высвечивается при нажатии клавиши E' .

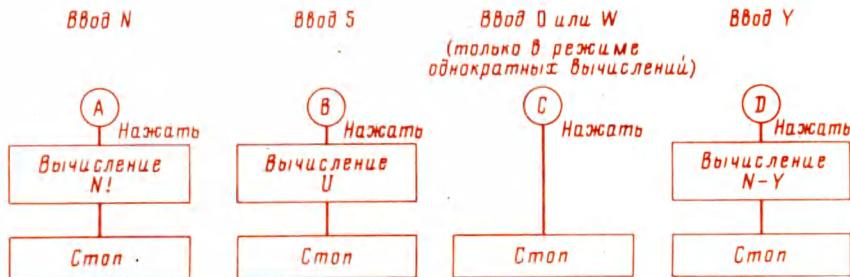
Вычисления методом весовых коэффициентов выполняются только в режиме однократного вычисления, а вычисления с коэффициентом, равным 1,0, не производятся. Значение $S(Y)$ при $W = 1$ можно получить по результатам вычислений при $W = 0$, однако результатирующее значение $S(N \rightarrow Y)$ будет неверно.

Время вычислений. Для вычисления коэффициента обслуживаемости системы, в которой функционируют любые 2 устройства из 3 (или 9 из 10 и т.д.), в режиме циклических вычислений требуется примерно 5 с; если функционируют 15 устройств из 30, необходимо 30 с, а если функционируют 25 устройств из 50, необходимо около 50 с. Следует отметить, что в последнем случае потребуется около 1000 нажатий клавиш. Для вычислений программа использует 10 регистров из 20 (регистры 01 – 10 не используются).

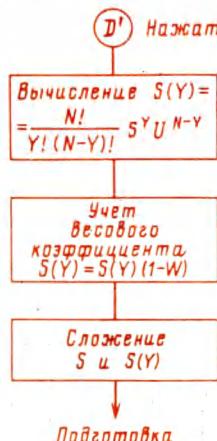
Резервные регистры можно использовать для запоминания результатов, а при других расчетах – для введения коэффициентов восстановления или определения коэффициентов обслуживаемости последовательного соединения устройств.

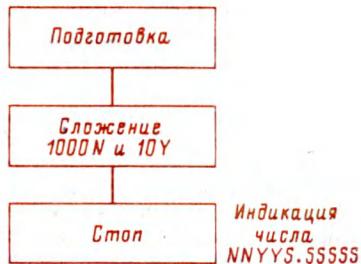
Схемы алгоритма

Ввод данных



Режим однократного вычисления

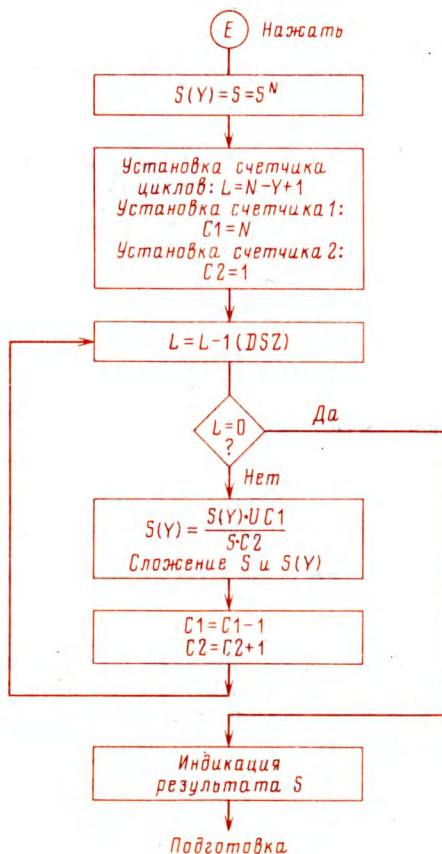




Высвечивание результирующего коэффициента обслуживаемости



Вычисление $S(N) \rightarrow S(Y)$



Текст программы

Адрес	Код	Кла-виша	Коммен-тари	Адрес	Код	Кла-виша	Коммен-тари
000	46	LBL	Ввод N		19	D'	
	11	A		050	43	RCL	
	42	STO			01	1	
	01	1			08	8	
	09	9			55	÷	
005	29	X!			43	RCL	
	42	STO		055	01	1	
	01	1			04	4	
	08	8			29	X!	
	00	0			55	÷	
010	42	STO			43	RCL	
	01	1		060	01	1	
	01	1			03	3	
	81	HLT			29	X!	
					65	x	
	46	STO	Ввод S		43	RCL	
015	12	B		065	01	1	
	42	STO			07	7	
	01	1			45	Y	
	07	7			43	RCN	
	75	—			01	1	
020	01	1		070	04	4	
	95	=			65	x	
	94	+/-			43	RCL	
	42	STO			01	1	
	01	1			06	6	
025	06	6		075	45	Y	
	81	HLT			43	RCL	
	46	LBL	Ввод W		01	1	
	13	C			03	3	
	42	STO			95	=	
030	01	1		080	42	STO	
	05	5			01	1	
	81	HLT			02	2	
					65	x	Учет весово-
	46	STO	Ввод Y		43	RCL	го коэффи-
035	14	D		085	01	1	циента
	42	STO			05	5	
	01	1			95	=	
	04	4			22	INV	
	75	—			44	SUM	
	43	RCL		090	01	1	
040	01	1			02	2	
	09	9			43	RCL	
	95	=			01	1	
	94	+/-			02	2	
	42	STO		095	44	SUM	
045	01	1			01	1	
	03	3			01	1	
	81	HLT			46	LBL	Суммиро-
							вание
	46	LBL	Однократное		16	A'	
			вычисление				Подго-
			S(Y)	100	85	+	товка

Текст программы (продолжение)

Адрес	Код	Кла-виша	Коммен-тарий	Адрес	Код	Кла-виша	Коммен-тарий
101	43	RCL		150	42	STO	
	01	1			00	0	
	09	9			00	0	
	65	x			43	RCL	
105	01	1			01	1	
	00	0		155	09	9	
	00	0			42	STO	
	00	0			01	1	
	85	+			04	4	
110	43	RCL			01	1	
	01	1		160	42	STO	
	04	4			01	1	
	65	x			03	3	
	01	1			46	LBL	
115	00	0			88	2'	
	95	=		165	22	INV	
	81	HLT			58	DSZ	
	46	LBL	Индикация результата S		87	1'	
	10	E		170	43	RCL	
120	43	RCL			01	1	
	01	1			02	2	
	01	1			55	÷	
	81	HLT			43	RCL	
	46	LBL	Вычисление S в цикле		01	1	
125	15	E			06	6	
	43	RCL			65	x	
	01	1		180	43	RCL	
	07	7			01	1	
	45	X ^Y			04	4	
130	43	RCL			55	÷	
	01	1			43	RCL	
	09	9		185	01	1	
	95	=			03	3	
	42	STO			95	=	
135	01	1			42	STO	
	02	2			01	1	
	42	STO		190	02	2	
	01	1			44	SUM	
	01	1			01	1	
140	43	RCL			01	1	
	01	1			01	1	
	09	9		195	22	INV	
	75	-			44	SUM	
	43	RCL			01	1	
145	01	1			04	4	
	04	4			44	SUM	
	85	+		200	01	1	
	01	1			03	3	
	95	=			41	GTO	

Текст программы (продолжение)

Адрес	Код	Кла- виша	Коммен- тарий	Адрес	Код	Кла- виша	Коммен- тарий
203	88	2'					<i>Регистры</i>
	46	LBL		00			Счетчик циклов
205	87	1'		11			Полный коэффициент об- служиваемости S
	43	RCL		12			S(Y)
	01	1		13			N-Y
	01	1,		14			Y
	16	A'		15			W
210	81	HLT		16			U
				17			S
				18			N!
				19			N

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОРА

Различные графики, приведенные в этой книге, отражают связь безотказности с быстродействием. К сожалению, быстродействие процессора очень сильно зависит от его применения и разнообразия исполняемых команд, однако приводимые значения быстродействия предназначены для отражения средних характеристик при решении коммерческих и научных задач. Для средних и больших систем базовой конфигурации поставщики могут обеспечить значения быстродействия, подобные использованным в практических примерах определения безотказности, однако в других случаях вычисления, основанные на объявленных значениях быстродействия, могут привести к ошибочному заключению об уровне безотказности.

В малых, мини- и микропроцессорах может отсутствовать аппаратура для вычислений над числами с плавающей запятой, поэтому быстродействие, гарантируемое при коммерческом применении процессоров, могло бы указывать на слишком низкий уровень безотказности. Однако оценки быстродействия, учитывающие время выполнения операций над числами с плавающей запятой, реализуемых программным путем, могут привести к гораздо меньшим значениям по сравнению с оценками быстродействия процессоров с аппаратурной реализацией тех же операций и, как следствие, к более высоким уровням ожидаемой безотказности. В тех случаях, когда возникают трудности, приемлемые оценки можно провести, определив полное время T (в микросекундах), затраченное на выполнение следующих команд:

Число команд	Тип команд
40	Сложение чисел с фиксированной запятой с запоминанием в аккумуляторе или в памяти (в зависимости от того, что выполняется медленнее);
35	Условный переход или переход по состоянию аккумулятора;
20	Перенос 8 байт с помощью команды пересылки или загрузки из памяти;
5	Сложение чисел с плавающей запятой (выполняется аналогично сложению чисел с фиксированной запятой). Если эта операция реализована программным способом или отсутствует, взять время выполнения 20 команд сложения чисел с фиксированной запятой.

Быстродействие (в тыс. команд/с) равно $100\,000/T$.

В последнее время на рынке появились процессоры для векторных и матричных вычислений, использующие новые способы организации вычислений, которые не приводят к столь значительному возрастанию числа компонентов, как это следовало бы ожидать при полученному быстродействии на указанных операциях. В этих случаях "скалярное" быстродействие, отражающее скорость выполнения последовательных, а не параллельных вычислений, должно быть увеличено в соответствии с относительным числом дополнительных компонентов процессора.

Оглавление

Предисловие редактора перевода	3
Введение	5
<i>Глава 1. Отказы</i>	7
Введение	7
График интенсивности отказов	7
Теоретическое предсказание надежности	8
Процессорные модули	8
Процессор	8
Периферийное оборудование и система в целом	10
Программное обеспечение	11
Трудности определения понятия отказа	11
Отказы с точки зрения пользователя	13
Модели отказов	13
Вероятность возникновения отказов	15
Экспоненциальное распределение	15
Распределение Пуассона	16
<i>Глава 2. Изменение безотказности во времени</i>	18
Стабилизация безотказности	18
Ранние дефекты	18
Семейство процессоров	21
Модели первой партии изделий	21
Ввод системы в эксплуатацию	23
Отказы из-за внешних воздействий	23
Отказы из-за износа системы и ожидаемый срок службы	24
Электронная аппаратура	24
Вычислительные машины	25
Запасные части	26
Периферийное оборудование	27
Обслуживание	27
Стоимость обслуживания	27
Улучшения и изменение нагрузки системы	28
Кондиционеры, силовое оборудование, помещение	28
<i>Глава 3. Вопросы обеспечения качества</i>	29
Проектирование	29
Методика	29
Результирующая безотказность	30
Качество проектирования	30
Нагрузка	31
Новая технология	33
Модификация	33
Большой процессор	34
Мини-ЭВМ	35
Лучший случай	36
Гарантия качества изготовления	37
Вопросы организации производства	37
Качество проектирования	38
Подбор компонентов	39

Контроль качества компонентов	40
Испытания модулей	41
Испытания блоков	42
Испытания систем	43
Упаковка и отправка системы потребителю	43
Данные об эксплуатации и анализ дефектов	44
Вопросы, которым не уделяют должного внимания	45
<i>Глава 4. Окружающая среда</i>	46
Кондиционирование воздуха	46
Влияние окружающей среды	46
Условия в помещении для средних и больших систем	47
Условия в помещении для мини-ЭВМ и малых систем базовой конфигурации	48
Требования к окружающим условиям при проектировании	48
Средние и большие процессоры	48
Малые ЭВМ и микропроцессоры	51
Периферийные устройства больших систем	51
Периферийные устройства мини- и микро-ЭВМ	52
Рассеивание тепла и требования к размещению	53
Процессоры	53
Безотказность и рассеивание тепла	55
Контроллеры периферийного оборудования и главная память	57
Периферийные устройства систем базовых конфигураций	57
Общее рассеивание тепла системами базовых конфигураций	57
Рассеивание тепла и размещение малых и мини-систем	58
Рассеивание тепла и размещение микропроцессорных систем	58
Необходимость кондиционирования воздуха	58
Рассеивание тепла и максимально допустимая температура	59
Минимальная относительная влажность	60
Максимальная относительная влажность	60
Пыль	61
Стоимость кондиционирования воздуха	61
Источники питания	62
Спецификации	62
Защита	63
Влияние включений и отключений на безотказность системы	63
Электромагнитное излучение	64
Спецификации	64
Требования к заземлению	64
Удары и вибрация	65
<i>Глава 5. Надежность программного обеспечения</i>	65
Сравнение с аппаратурой	65
Причины отказов	65
Интенсивность ошибок	66
Исправления	67
Ранняя стадия жизни	67
Классификация ошибок программного обеспечения	68
Проблема отказов с точки зрения пользователя	68
Ошибки, представленные пользователем	68
Ошибки, признанные производителем	70
Идентифицированные и исправленные ошибки	71
Общая интенсивность ошибок	71
Гарантия качества программного обеспечения	72
Конфигурации	72
Состав испытаний	72
Длительность испытаний	72
Критерии успеха	72
Организация испытаний	73
Эффективность испытаний	73

Сервисное программное обеспечение	73
Задержки исправления ошибок	73
Время реакции	73
Приоритеты	74
Обслуживаемость, время простоя и системные отказы	75
Изменение надежности во времени	76
Средние результаты на длительных промежутках времени	76
Средние результаты на коротких промежутках времени	77
Результаты на коротких периодах для отдельных систем	78
Разбросы значений безотказности. Сравнение с аппаратурой	79
Отличия у разных потребителей	80
Разбросы значений безотказности на длительных промежутках времени	81
Разбросы значений безотказности для машин одного типа	81
Разбросы значений безотказности на коротких промежутках времени	82
Спецификация на надежность программного обеспечения	83
Глава 6. Признаки неисправностей	84
Последствия отказов	84
Необнаруженные ошибки	84
Процессоры	85
Периферийное оборудование	86
Спецификации, задаваемые производителем	88
Система в целом	89
Признаки неисправностей, фиксируемые пользователем	89
Процессоры	90
Периферийное оборудование	90
Признаки ошибок программного обеспечения	93
Управляющая часть операционной системы	93
Компиляторы и ассемблер	94
Глава 7. Время простоя и время обслуживания	95
Время простоя	95
Сравнительные характеристики времени простоя и классификация неисправностей	97
Время исследования	98
Малая вычислительная машина	98
Мини-ЭВМ	100
Большая вычислительная машина	100
Периферийное оборудование	102
Время простое, наблюдаемых пользователем	102
Распределение	103
Влияние ремонтопригодности	104
Время простоя системы	105
Время простоя периферийного оборудования	106
Время планового обслуживания	106
Время дополнительного обслуживания	108
Глава 8. Коэффициенты обслуживаемости и готовности	108
Определения	108
Историческая справка	110
Первые вычислительные системы	110
Мультипрограммирование	111
Весовые коэффициенты	111
Различие в результатах измерений	113
Различные методы измерения	113
Разброс значений коэффициентов обслуживаемости	114
Влияние безотказности системы на интервальный коэффициент	115
Зависимость интервального коэффициента от периода времени	117
Зависимость интервального коэффициента от времени простоя	117
Наихудшие случаи	117
Глава 9. Ремонтопригодность и отказоустойчивость	120
Определения	120

Диагностирование неисправностей	121
Испытательные программы	122
Диагностические испытательные программы	122
Функциональные испытательные программы	123
Тренировочные испытательные программы	124
Программы проверки взаимодействия	127
Программы, реализуемые в процессе рабочего функционирования системы	127
Программы проверки временных характеристик	129
Программы проверки совместимости	130
Средства тестовой проверки аппаратуры	130
Испытательные пульты	131
Диагностические процессоры	131
Тестеры для модулей	132
Модульные принципы	133
Конструктивный модульный принцип	133
Функциональный модульный принцип	134
Интегральные микросхемы с большой степенью интеграции	136
Предельные режимы	138
Изменения напряжения питания	139
Изменения временных характеристик	139
Температурные изменения	139
Другие виды задания изменений	140
Обнаружение и исправление ошибок	140
Проверка четности	140
Исправление ошибок	141
Регистрация отказов	142
Регистрация истории системы	142
Журнал ошибок	143
Вывод на пульт и дисплей	144
Избыточность и реконфигурация	144
Организация обслуживания	146
Расходы на обслуживание	146
Необходимые ресурсы	147
Влияние ремонтопригодности и отказоустойчивости	148
Измерения	148
Измерение на коротких периодах	149
<i>Глава 10. Приемочные испытания</i>	151
Необходимость проведения испытаний	151
Испытания на надежность	152
Проверка возможностей и измерение производительности	155
Средства поддержки	155
Стандартные процедуры Центрального агентства по вычислительной технике	157
Демонстрации	158
Циклическая проверка	160
Роль инспектора	163
Отчетные документы	164
Графики проверок	164
Результаты испытаний	165
Достоинства и недостатки процедур испытаний Центрального агентства по вычислительной технике	168
Устаревшая стандартная процедура испытаний Центрального агентства по вычислительной технике	169
Процедуры Главного управления по обслуживанию	170
<i>Глава 11. Практические оценки надежности</i>	171
Электронное оборудование	171
Общие замечания	171
Центральный процессор	171

Оперативное запоминающее устройство	174
Надежность и архитектура системы	175
Контроллеры периферийных устройств	177
Примеры значений относительной безотказности	178
Время исследований	179
События и время простоя с точки зрения пользователя	180
Периферийные устройства	182
Накопители на сменных магнитных дисках	182
Факторы, влияющие на надежность	183
Накопители на магнитных лентах	184
Краткие выводы	185
Примеры предсказания надежности	187
Предсказание надежности программного обеспечения	190
Пример предсказания безотказности программного и аппаратурного обеспечения	192
Качество работы системы с точки зрения пользователя	193
Глава 12. Практическое вычисление безотказности и обслуживаемости сложных систем	194
Параллельное и последовательное соединение устройств	194
Параллельное соединение устройств	194
Последовательное соединение устройств	196
Коэффициент восстановления	197
Сложные соединения	198
Вычисление коэффициента обслуживаемости системы в целом	199
Системы средних размеров	200
Обслуживаемость и безотказность на коротких периодах времени	206
Время обработки программ неисправной системой	207
Вычисление коэффициента обслуживаемости методом весовых коэффициентов	207
Плановое обслуживание	208
Многопроцессорные системы	209
Системы коммутации сообщений	210
Многопроцессорная мини-система	211
Подсистемы связи	214
Надежность линий связи	215
Модемы	216
Терминалы	216
Приложение 1. Тренировочные испытательные программы, написанные на языке ФОРТРАН	221
FOPR00 – тест процессора	221
FOPR01 – тест процессора и запоминающего устройства	223
FOPR02 – тест процессора	226
FOPR03 – тест процессора	228
FOPR04 – тест процессора	229
FODK00 – тест накопителя на магнитных дисках (произвольный доступ)	233
FODK01 – тест накопителя на магнитных дисках или FOMT01 – тест накопителя на магнитных лентах	238
FODK02 – тест накопителя на магнитных дисках или FOMT00 – тест накопителя на магнитных лентах	246
FODK03 – тест накопителя на магнитных дисках или FOMT02 – тест накопителя на магнитных лентах	248
FOLP00 – тест печатающего устройства	253
FOCP00 – тест устройства вывода на перфокарты	261
FOCR00 – тест устройств ввода с перфокарт	263
FOTP00 – тест устройства вывода на перфоленту	267
FOTR00 – тест устройства ввода с перфоленты	269
Приложение 2. Вычисление коэффициента обслуживаемости сложных систем с помощью программируемого калькулятора	272
Приложение 3. Оценка быстродействия процессора	278

Р. Лонгботтом

НАДЕЖНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Редактор П. П. П а р х о м е н к о

Редактор издательства Л. Д. Н и к у л и н а

Художественный редактор А. Т. К и р ь я н о в

Технические редакторы О. С. Б ы к о в а, Г. Н. Л я д у х и н а

Оператор М. А. П а н ф и л о в а

Корректор С. В. М а л ы ш е в а

ИБ 720

Набор выполнен в Энергоатомиздате на Композере ИБМ-82. Подписано в печать 22.11.84. Формат 60x901/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,0. Усл. кр.-отт. 33,0. Уч.-изд. л. 22,70. Тираж 11 500 экз. Заказ 2082 . Цена 1 р. 90 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

Лонгботтом Р.

Л 76 Надежность вычислительных систем: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 288 с., ил.

1 р. 90 к. 11 500 экз.

Дано систематизированное изложение вопросов обеспечения и поддержания надежности ЭВМ и вычислительных систем с позиций разработчика и пользователя. Рассмотрена надежность аппаратуры и программного обеспечения больших, средних, малых, мини- и микро-ЭВМ и систем. Освещены вопросы технического обслуживания вычислительной техники в условиях эксплуатации и процедуры приемочных испытаний. Даны методика практических расчетов надежности ЭВМ и систем. В приложениях даны практически используемые тесты для процессоров и периферийного оборудования.

Для инженеров и научных работников в области разработки и эксплуатации вычислительной техники.

Л 2405000000-301
051 (01) - 85 277-84

ББК 32.972
6Ф7

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭНДРІ ОАТОМІЗДАТ ГОТОВИТЬ К ИЗДАНИЮ:

Дружинін Г. В. Надежность автоматизированных систем. -- 4-е изд., перераб. и доп. -- М.: Энергоатомиздат, 1986 -- 32 л.: ил. -- (В пер.): 1 р. 90 к.

Рассмотрены особенности оценки надежности технических объектов и систем по данным о приближении к отказам. Изложены практические приемы вероятностного моделирования для предсказания надежности. По сравнению с изданием 1977 г. подробнее изложены мероприятия по формированию показателей надежности проектируемых объектов, а также новые методы оценки их надежности, глубже рассмотрены вопросы надежности технологических систем и процессов.

Для инженеров, занимающихся разработкой и проектированием систем автоматизации, в частности, вопросами обеспечения их надежности.

Киселев В. В., Кон Е. Л., Шеховцев О. И. Автоматизация поиска дефектов в цифровых устройствах. — Л.: Энергоатомиздат, 1986 — 8,5 л.: ил. — (В обл.) : 45 к.

Рассмотрены вопросы диагностирования цифровых устройств: методы проверки и поиска одиночных и кратких дефектов. Предложены алгоритмы синтеза проверяющих тестов и тестов поиска дефектов. Даны рекомендации по автоматизации процесса диагностирования с помощью средств малой вычислительной техники.

Для инженерно-технических работников, занятых разработкой и эксплуатацией систем диагностирования. Может быть полезна студентам и аспирантам электротехнических вузов.

Малышенко Ю. В., Чипулис В. П., Шаршунов С. Г. Автоматизация диагностирования электронных устройств. Под ред. В. П. Чипулиса — М.: Энергоатомиздат, 1986 — 14 л.: ил. — (В обл.): 70 к.

Рассмотрены основы теории и практические методы автоматизации диагностирования цифровых и аналого-цифровых электронных устройств, построенных на ИМС. Основное внимание удалено методам структурно-функционального моделирования поведения устройств, получения и оптимизации диагностической информации, поиска неисправностей. Приведено описание систем автоматизации диагностирования как комплексов технических средств, программного и информационного обеспечения.

Для инженеров и научных работников, специализирующихся в области технической диагностики электронных устройств.

