

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**Санкт-Петербургский государственный технологический
университет растительных полимеров**

**А.К. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, В.В. ПОЖИТКОВ
Г.А. КОНДРАШКОВА**

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
Часть 3**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2005

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

62-5(075)
2-657

А.К. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, В.В. ПОЖИТКОВ

Г.А. КОНДРАШКОВА

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Часть 3



Санкт - Петербург

2005

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Санкт-Петербургский государственный технологический
университет растительных полимеров

А.К. Хмельницкий, В.В. Пожитков, Г.А. Кондрашкова

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Часть 3

СПГТУРП
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ
ЦЕНТР
С-Петербург, ул.Ивана Черных, 4

Санкт - Петербург
2005

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

ББК 32. 965 я 7
Х 657
УДК 519.24 (075)

ХМЕЛЬНИЦКИЙ А. К., ПОЖИТКОВ В.В., КОНДРАШКОВА Г.А.

Диагностика и надежность автоматизированных систем: Учебное пособие / ГОУВПО СПбГТУ РП. СПб., 2005. Часть 3. 56 с.: ил. 9.

Настоящая часть учебного пособия посвящена основам технической диагностики, предназначена для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем».

Рецензенты: профессор Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), доктор технических наук Русинов Л.А.; профессор Санкт-Петербургской академии холода и пищевых технологий, доктор технических наук Болюбаш В.А.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

Редактор и корректор Т.А. Смирнова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2005 г., поз. 65

Подп. к печати 27.05.05. Формат бумаги 60 x 84/16. Бумага типа. №1.
Печать офсетная. Печ. л. 3,75. Уч.- изд. л. 3,75. Тираж 100 экз.
Изд. №65. Цена «С» 65. Заказ 858

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4

© ГОУ ВПО Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров,
2005

© Хмельницкий Артур Константинович
Пожитков Владимир Васильевич
Кондрашкова Галина Анатольевна, 2005

ВВЕДЕНИЕ

Эта часть учебного пособия посвящена проблеме диагностирования неисправностей. Понятие «диагностика» означает распознавание, определение. Рост роли и значения технической диагностики связан с общим развитием техники: усложнением систем, необходимостью обеспечения надежной и безаварийной работы этих систем, увеличением степени опасности и тяжести последствий. Например, в настоящее время появилось большое число программ, в которых не все блоки программируются одинаково тщательно и подробно, в результате чего теряется однородность написания различных блоков. К сожалению, это обнаруживается слишком поздно. Также часто встречается ситуация, когда безошибочно работавшая программа применяется в новой задаче и на других исходных данных дает неприемлемые по точности или по времени счета результаты. Существует ряд других факторов, способствующих появлению в программах ошибок. Проблемы возникают не только с программным обеспечением, но и с системой. Часто перед нами стоит задача обнаружить причину той или иной неисправности для того, чтобы в дальнейшем ее устранить. Для этого и используются различные методы диагностирования, которые рассматриваются в настоящем учебном пособии.

Раздел 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Глава 1. Основы технического диагностирования

1.1. Общие сведения по технической диагностике СУ

Самой важной характеристикой СУ (систем управления) является восстанавливаемость. Здесь в первую очередь возникают вопросы, связанные с обнаружением факта отказа и с поиском отказавших элементов.

Наблюдение за работоспособностью системы и поиск дефекта, составляющие подчас до 90 % времени, затрачиваемого на восстановление системы, имеют в этом случае определяющее значение [3].

Последующие этапы развития и усовершенствования СУ приводят к противоречиям. Во-первых, требования к надежности систем повышаются, а во-вторых – их усложнение приводит, как правило, к снижению надежности. Так как конструктивные, схемные и технологические возможности повышения надежности СУ ограничены, то очевидным путем устранения этих противоречий является разработка методов и средств контроля работоспособности и поиска дефекта, т.е. решение задач, присущих технической диагностике.

Переход к диагностике обычно есть результат успешных исследований в той или иной области науки, позволяющий от теоретических обобщений перейти к их воплощению в практике. Само по себе диагностирование основывается на разработках, которые охватывают практически все стороны научной проблемы. Теория проектирования может быть создана усилиями специалистов в различных областях технической диагностики.

Техническая диагностика - область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объекта [9].

Техническая диагностика является научной дисциплиной, содержание которой заключается в изучении и определении действительного состояния системы и характера его изменения во времени. Задачи, которые решает диагностика, очень разнообразны и сложны. Она особенно интенсивно развивается в направлении совершенствования формализованных методов алгоритмизации поиска дефектов и определения работоспособности устройств и систем. Создаются рациональные аналитические методы построения программ диагнос-

тирования, находятся пути и способы сокращения объема необходимых вычислений, также определяются методы оптимизации поиска дефектов и оптимизации программ диагностирования. Структура технической диагностики представлена на рис. 1.

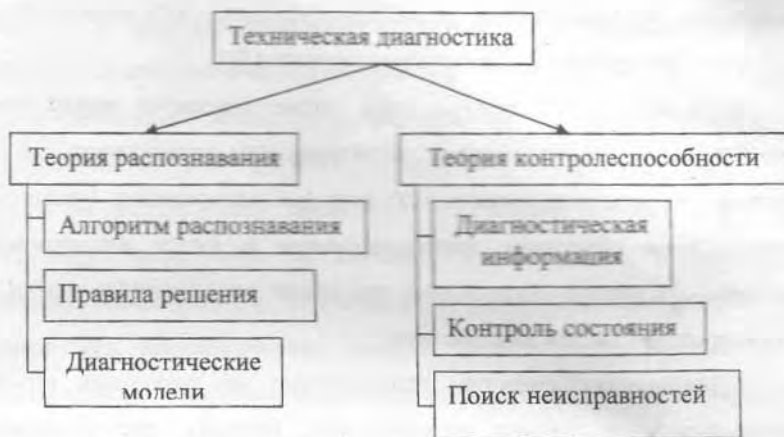


Рис. 1. Структура технической диагностики

Важным направлением технической диагностики является *контролепригодность*, т.е. свойство объекта обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Она обеспечивается конструкцией объекта и принятой системой технической диагностики. Одной из задач теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации, а также разработка алгоритмов поиска неисправностей и диагностических тестов минимизации времени процесса установления диагноза [9].

Техническое состояние – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической докумен-

тацией на объект. Ее основной целью является распознавание состояний технической системы в условиях ограниченной информации.

Как известно, *техническая диагностика* направлена на исследование текущего состояния объектов диагностирования и форм его проявления во времени, на разработку методов его определения и принципов построения систем диагностирования [3].

В диагностике важную роль играет *система технического диагностирования*, под которой подразумевается совокупность системы технического диагностирования и объекта диагностирования. Поскольку в нашем случае объектами диагностирования являются автоматические системы, их модели специфичны, это ставит определенные задачи при проектировании систем диагностики.

Технические средства, используемые на различных объектах диагностирования, весьма разнообразны. Поэтому диагностирование должно учитывать различие в формах проявления технического состояния СУ, являющиеся объектами диагностирования (ОД), целесообразность использования тех или иных методов определения работоспособности и поиска неисправности и особенности технической реализации средств диагностирования [9].

Условия непрерывной эксплуатации систем различного назначения в отрыве от ремонтной базы при ограниченном времени их восстановления заставляют ориентироваться не только, а подчас и не столько на обнаружение места возникновения дефекта, сколько на определение его характера, возможных последствий.

Состояние ОД оценивается по диагностическим признакам. Под *диагностическим признаком* понимается параметр или характеристика, используемая при диагностировании. Что же касается характеристик, то они бывают статическими или динамическими.

Статической характеристикой называется такая характеристика, которая не зависит от частоты, времени. Если она все же зависит, то она является *динамической*.

Каждому состоянию соответствует определенное значение диагностического признака. Диагностические параметры выбираются в результате анализа диагностической модели.

Диагностическая модель – формальное описание объекта диагностирования, которое учитывает изменение его состояния. Т.е. диагностическая модель – это заданная и подлежащая математической обработке связь внутренних и внешних управляющих, а также возмущающих параметров и реакций СУ. Диагностическая модель формируется как математическая модель объекта – совокупность дифференциальных и алгебраических уравнений, эмпирических формул. Можно выделить достаточно большое число диагностических моделей: эмпирические, полуэмпирические и аналитические модели. Аналитические модели обладают наибольшей общностью, однако имеют недостатки: низкую точность и большую трудоемкость получения решения для сложных случайных процессов.

Описание объекта диагностирования может быть в графической, табличной, аналитической и других формах.

Техническое диагностирование предполагает определение технического состояния ОД с определенной точностью. Причем результатом этого процесса должно быть заключение о техническом состоянии объекта с указанием места, а при необходимости, вида и причины дефекта.

В диагностике важным понятием является *диагностирование*, под которым понимается процесс определения состояния технического объекта.

Различают следующие *способы диагностирования*:

1. *Рабочее*, при котором на объект подаются рабочие воздействия.
2. *Тестовое*, при котором на объект подаются тестовые воздействия, вызывающие его реакцию.

Под *диагнозом* понимается результат диагностирования, т.е. заключение о техническом состоянии объекта. Важными понятиями в диагностике являются метод и алгоритм диагностирования. Под *методом диагностирования* понимается совокупность операций, действий, позволяющих дать объективное заключение о состоянии объекта. А под *алгоритмом диагностирования* понимается совокупность предписаний, которые определяют порядок действий при проведении диагностирования. Алгоритм диагностирования реализуется с помощью средств технического диагностирования.

Под *средствами технического диагностирования* понимается система, программы и т.п.

При решении основных задач диагностирования возможны различные действия по формированию диагноза (рис. 2):

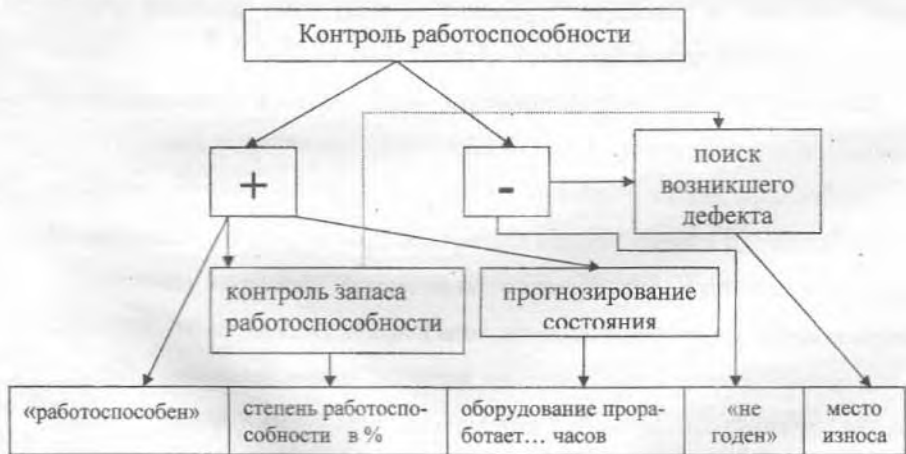


Рис. 2. Процесс постановки диагноза

В процессе диагностирования обычно принимают участие: объект диагностирования, средства технического диагностирования и человек-оператор. Между ними наблюдается как прямая, так и обратная связи (рис. 3):

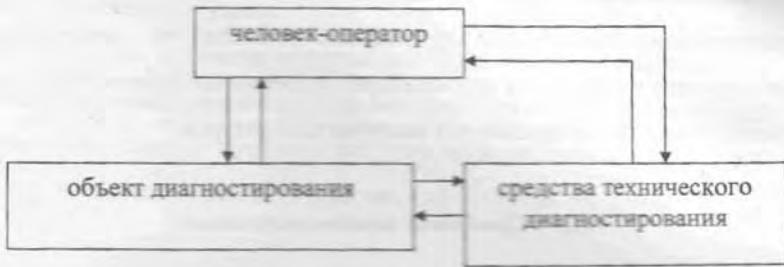


Рис. 3. Схема системы диагностирования

Можно выделить следующие стадии технического диагностирования (рис. 4):

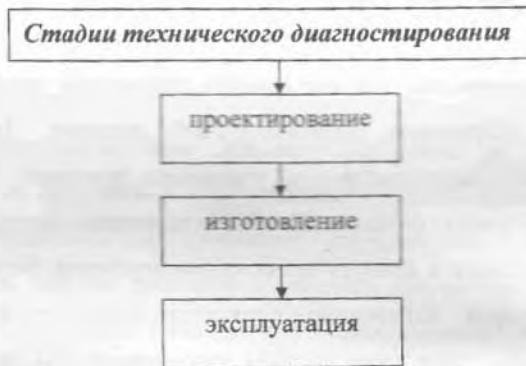


Рис. 4. Стадии технического диагностирования

Проектирование – процесс анализа, планирования затрат и сроков разработки, разработка технической и эксплуатационной документации, по которой объект создается и будет эксплуатироваться,

Изготовление – процесс реализации технических требований, включая испытания как этап проверки характеристик оборудования, собранного из частей.

Эксплуатация – набор организационно-технических мероприятий, обеспечивающих правильное применение объекта по назначению, постоянную его готовность к применению, поддержание работоспособного состояния объекта и продление его технического ресурса.

1.2. Проблемы диагностирования

Существует целый ряд проблем диагностирования, рассмотрим основные из них.

Во-первых, проблемы, связанные с *ростом объема измерительной информации*. В настоящее время в технике наблюдается прогресс, который выражается в росте используемой измерительной информации. Следовательно, количество диагностических параметров растет за счет усложнения и удорожания контролируемой системы. Техническое диагностирование заключается в измерении значений параметров качества, которые зависят от большого объема влияющих на них факторов: нагрузок механического и климатического происхождения, биологических и специальных сред. Количество влияющих факторов превосходит несколько десятков (они тоже должны учитываться при диагностировании).

Во-вторых, проблемы, связанные с *повышением быстродействия измерения и обработки диагностической информации*. Т.е. возникает необходимость перехода к контролю технических объектов по их состоянию (к контролю в процессе работы систем в реальном масштабе времени).

В третьих, проблемы связанные с *слабой осведомленностью разработчиков в методах диагностирования*. На стадии проектирования разработчики разрабатывают систему так, что она непригодна для диагностирования. За счет чего сокращается срок службы оборудования, возникают аварийные ситуации.

В четвертых, проблемы связанные с *необходимостью повышения точности и надежности измерений*. Без точных и надежных измерений невозможен объективный контроль качества промышленной продукции, правильный технический диагноз, действенный контроль состояния СУ.

1.3. Методы повышения качества технической диагностики

Существуют следующие методы развития технической диагностики [5]:

- 1. Использование нескольких способов диагностирования*, т.е. если один способ диагностирования не дал желаемого результата в полной мере другой способ может его дополнить.
- 2. Автоматизирование всех этапов получения и обработки информации, полученной в результате диагностирования* - это стало возможным за счет появления специального программного обеспечения, которое способно обработать результаты диагностирования. В настоящее время широко используются встроенные микроЭВМ. Производится перевод информации диагностики в цифровую форму.
- 3. Обеспечение единого мониторинга всей системы в целом, с учетом влияния окружающей среды*. Чем больше степень влияния внешних факторов на систему, тем масштабней должна быть проведена техническая диагностика.

4. *Усовершенствование алгоритма проведения диагностики.* Часто из-за неправильной последовательности диагностирования диагностика не дает желаемого результата.
5. *Совершенствование организационного обеспечения.* Статистика дает следующие результаты: 20 % отклонений от стандартов - вина персонала, а 80 % - вина руководства предприятия. Его нельзя обеспечить только с помощью технического контроля – оно должно быть заложено в изделие, причем на самых ранних этапах его производства. Разработка новых систем не может не предусматривать затраты на их контрольно-диагностическое сопровождение.

Глава 2. Обнаружение неисправностей в СУ

2.1. Методика обнаружения неисправностей

Несмотря на многообразие типов СУ, в решении задач поиска неисправностей существует много общих моментов. Главная цель состоит в том, чтобы найти и выделить эти моменты и на их основе построить методы диагностики, направленные на поиск неисправностей. Самое целесообразное – это сузить границы области неисправностей части системы до тех пор, пока неисправность не будет локализована до конкретного поврежденного элемента. Это означает, что каждый последующий шаг предпринимается на основе информации, полученной от предыдущего испытания, указывающей, какая часть системы может быть исключена из рассмотрения как исправная. Для применения этого метода необходимо систему разделить вначале на крупные элементы с отбрасыванием исправных элементов, затем на все более мелкие. Этот метод называется *методом последовательного приближения*. Он является необходимым, но недостаточным элементом методики. Для его

реализации необходимы определенные способы испытаний при обнаружении неисправностей и порядок их использования, вытекающий из особенностей системы и характера возникающей неисправности.

Очевидно, что главными задачами диагностирования являются: контроль за техническим состоянием, поиск неисправностей, прогнозирование состояния системы, проверка исправности, работоспособности, с выявлением элементов, от которых непосредственно зависит работоспособность, также определение предельных значений параметров, обеспечивающих работоспособность элементов, проверка правильности функционирования, разработка алгоритма последовательности проверок для определения фактического состояния и прогнозирования остаточного ресурса системы.

Большое значение в диагностике имеет прогноз. Само слово «прогноз» происходит от греческого слова «prognosis», которое означает предвидение, предсказание о развитии чего-либо, основанное на определенных данных, например, прогноз состояния технического объекта. С точки зрения философии, всякое научное предвидение – это распространение известных законов, типов взаимодействий на область рассматриваемых явлений, недоступных экспериментальному изучению. Самое главное – точность прогноза, которая зависит от того, какой закон используется и насколько правильно и точно он осознан. Выполнить достоверное прогнозирование можно только в том случае, когда известны условия, в которых объект диагностирования будет применяться. Под условиями понимается: режимы использования, характер нагрузки, внешние факторы. Чем больше физических процессов, являющихся причинами деградации объекта, тем сложнее характер изменения работоспособности, тем сложнее осуществить точное прогнозирование.

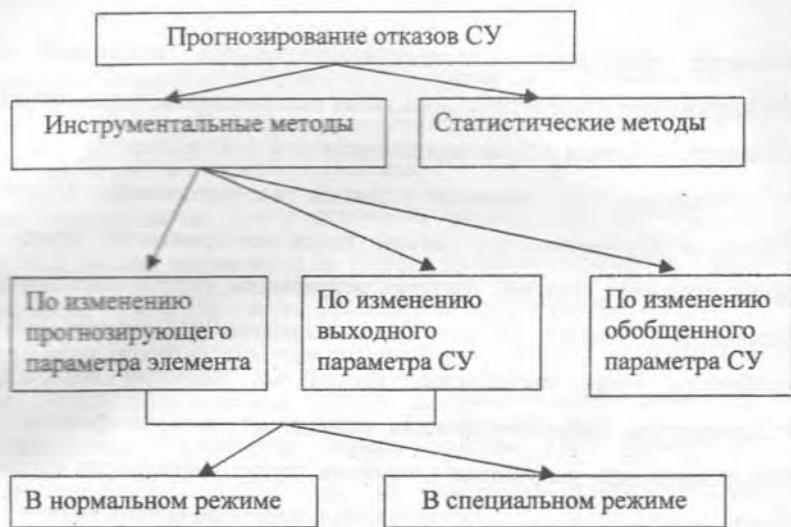


Рис. 5. Классификация методов прогнозирования

Элементы, у которых изменение их структуры можно проконтролировать, т.е. можно указать прогнозирующий или косвенно с ним связанный выходной параметр, подвергаются *инструментальному прогнозу*.

При отсутствии прогнозирующего параметра неисправные элементы выявляются *статистическими методами прогнозирования*.

На рис. 5. представлена классификация существующих в настоящее время направлений инструментального прогноза [11]:

- по изменению прогнозирующего параметра элемента;
- по изменению выходного параметра СУ;
- по изменению обобщенного параметра СУ.

Прогнозирование отказов во – первых, в двух направлениях может осуществляться как методами непосредственного контроля прогнозирующих параметров или косвенно с ними связанных параметров (в нормальном режиме), так и методами инструментального прогноза с

имитацией явлений старения, износа или других возмущающих факторов (в специальном режиме).

Сущность прогнозирования в нормальном режиме состоит в периодическом измерении параметра g и построении графика изменения величины этого параметра во времени. Экстраполируя результаты измерений параметра, можно получить кривую зависимости $g=f(t)$ и, зная величину допустимого значения параметра $g_{кр}$, определить время предупредительной замены или восстановления элемента.

Сущность прогнозирования в специальном режиме заключается в применении перегруженных или облегченных режимов (граничных режимов) работы элементов. Такое искусственное испытание элементов применяется для более раннего выявления тенденции к резкому ухудшению прогнозирующего параметра. Чувствительность прогноза при этом повышаются.

Прогнозирование в специальных контрольных режимах имеет следующие достоинства:

1. Достаточно высокая степень чувствительности прогнозирования. Имеется возможность такой отбраковки элементов, которая обеспечивает их работу в более тяжелых, чем нормальные, условиях эксплуатации.

2. Сравнительно простая система прогнозирования. Если же прогнозирующий параметр совпадает с выходным, то можно обходиться и без специальных приборов прогноза, так как отбраковка неисправных элементов, контроль их качества проверяются функционированием всей системы.

К недостаткам инструментального метода по изменению прогнозирующего параметра элемента следует отнести:

1. Необходимость создания устройств, обеспечивающих получение специальных контрольных режимов.

2. Проведение испытаний элемента в тяжелых специальных режимах, что в отдельных случаях может приводить к преждевременному старению.

3. Отсутствие возможности прогноза в нормальном режиме эксплуатации, что приводит к дополнительным простоям системы на профилактике.

Прогнозирование отказов по изменению выходного параметра СУ в нормальном эксплуатационном режиме также имеет свои достоинства и недостатки.

Достоинства метода:

1. Сокращаются простои на профилактике, так как контролируется вся СУ в целом.

2. При профилактических работах с автономными системами прогноза не требуется демонтаж и монтаж элементов. Возможно прогнозирование несъемных элементов.

Недостатки метода:

1. Большой объем работ по определению изменения выходного параметра за период времени. Эту работу необходимо проводить каждый раз при разработке и изготовлении новых типов систем.

2. Для системы, собранной на элементах, не имеющих прогнозирующего параметра, нельзя воспользоваться сокращенной методикой испытаний.

Метод прогнозирования отказов элементов по изменению обобщенного параметра обладает высокой чувствительностью и позволяет в процессе профилактических испытаний выявить значительную часть неисправностей. Кроме того, он позволяет предотвращать некоторые виды внезапных отказов.

Обобщенным параметром СУ называется такой параметр, который в любой момент времени может характеризовать ее работоспособность. Он обобщает все данные о работоспособности системы по каждому из выходных параметров в единый критерий качества работоспособности.

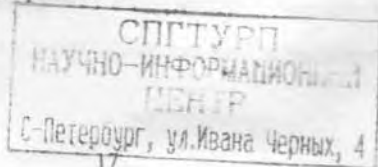
Недостатки метода:

1. Трудоемкость испытаний. Однако затраты на испытания могут себя окупить, если они будут проводиться для СУ массового использования.

2. Возможность преждевременного изнашивания системы в результате введения специальных контрольных режимов.

Внедрение в новую СУ встроенных систем автоматического контроля параметров, обнаружения и прогнозирования отказов требует решения задач, которые связаны с рациональным выбором контролируемых параметров и допустимых пределов их изменения. Диагностика состояния СУ может осуществляться или с применением серийных приборов, либо специальными измерительными устройствами или автоматическими системами контроля (встроенные или автономные).

Элементы устройств диагностирования проектируются таким образом, чтобы их отказы не приводили к нарушению объекта диагностики. Хотя логическая связь между отказами системы для проведения диагностики и объектом контроля существует. Она выражается в том, что если в системе контроля происходят отказы, то это ведет к получению ложных результатов диагностики, поскольку обслуживающий персонал на основании данных, получаемых от устройств контроля, а также на основании непосредственного наблюдения за работой системы делает вывод о ее исправности.



В том случае, если система диагностики обнаружила неисправность, а в действительности она отсутствовала, то это ведет к материальным затратам, вызванным простоем оборудования.

Диагностика состояния системы приводит к улучшению количественных характеристик надежности, но при неисправном состоянии системы диагностирования это преимущество может быть заниженным и экономически нецелесообразным. Важным мероприятием, позволяющим существенно уменьшить влияние надежности контролирующей системы, является применение системы самоконтроля. Если самопроверка системы контроля осуществляется всякий раз перед контролем системы, то вероятность отказа контролирующей системы будет определяться за сравнительно короткий отрезок времени проверки и окажется весьма малой.

Понятно, что когда мы имеем дело с внешними, автономными системами диагностики, то подключение их к объекту диагностирования производится только на период контроля, следовательно, они не оказывают влияния на надежность проверяемого объекта. В тоже время, встроенные системы контроля могут оказывать влияние на надежность объекта.

Важно отметить, что диагностика параметров и характеристик объекта может осуществляться при работающем или неработающем объекте.

Пример: контроль СУ самолета перед стартом осуществляется в условиях, когда система не работает или работает в режимах, отличных от расчетных.

В тех случаях, когда диагностируется неработающий объект, то для получения достоверной информации необходимо подать на вход «испытательные» сигналы. Эти сигналы могут иметь различную природу.

Надо отметить, что число входных сигналов может не равняться числу выходных. В каждом конкретном случае в качестве контролируемых параметров выбираются такие, которые позволяют однозначно и достаточно полно оценить работоспособность того или иного элемента системы.

Так как системы контроля перерабатывают информацию, носителями которой являются сигналы, а контролируемые параметры могут иметь различную природу, то в объекте контроля обычно устанавливаются датчики, выходные сигналы которых пропорциональны контролируемым параметрам.

Если мы имеем дело с СУ, то можно выделить следующие моменты обнаружения неисправностей: сразу же после включения системы; в процессе нормальной работы системы; когда неисправность вне зависимости от момента появления сопровождается признаками аварийного характера.

Если неисправности проявляются сразу же после включения СУ, это говорит о том, что, скорее всего, они возникли из-за нарушения правил транспортировки, после профилактики. В этом случае часто наблюдается появление нескольких неисправностей. Существует следующая последовательность обнаружения неисправностей:

- проверить правильность установки исходных положений рабочих органов переключения и регулировки;
- проверить источники питания на соответствие выдаваемых ими напряжений номинальным значениям.

Если возможно, необходимо устранить влияние возможных расстроек, т.е. органами регулировки и настройки попытаться добиться нормального режима работы. В том случае, когда подстройкой и регулировкой нельзя достигнуть нормальных показателей работы и

исправности источников питания, то это говорит о том, что имеют место повреждения. Для обнаружения элемента с повреждением необходимо придерживаться следующей последовательности:

- применяя имеющиеся в СУ органы регулировки (переключения), добиться максимально возможного сужения границ неисправного участка системы;
- произвести анализ признаков повреждения и возможных причин его появления;
- используя способ промежуточных измерений и другие способы, найти поврежденный элемент и установить причину отказа.

Другая последовательность испытаний рекомендуется при обнаружении неисправностей, которые возникают в процессе нормальной работы системы. Поиск неисправностей надо начинать с опроса персонала об обстоятельствах, которые сопутствовали появлению неисправности. Эта информация является полезной, так как она может выявить неправильные действия людей. Дальнейшие поиски неисправности проводятся по вышеизложенной схеме.

Если обнаружение неисправностей сопровождается признаками аварийного характера, то их обнаружение проводится следующим образом:

- выключают систему или ее часть, в которой наблюдается признак аварийного характера;
- производят внешний осмотр в аварийном участке для того, чтобы обнаружить поврежденный элемент.

Заменять поврежденный элемент нельзя до тех пор, пока не установлена причина неисправности.

2.2. Оптимизация поиска отказов

Имеется много способов обнаружения неисправностей. Рассмотрим возможные пути определения оптимальных программ. Представим, что мы имеем систему, состоящую из N последовательно соединенных элементов, имеющих одинаковую надежность. Метод последовательных приближений может быть оптимизирован по минимуму числа испытаний. Допустим, что один из N элементов имеет неисправность, тогда всю цепочку элементов можно поделить на две части таким образом, что в одной части будет h элементов, а в другой $N-h$.

Выдвинем две гипотезы:

- неисправный элемент с вероятностью: $p_1 = h/N$ может оказаться среди h элементов;
- неисправный элемент с вероятностью $p_2 = ((N-h)/N)$ – среди $N-h$ элементов.

Среднее число элементов z , среди которых может оказаться отказавший элемент после одной проверки:

$$z = hp_1 + (N-h)p_2. \quad (1)$$

Очевидно, что z достигнет \min при $h = 0,5N$.

Следовательно, для того, чтобы поиск неисправности был оптимальным, необходимо последовательно делить цепочку элементов на две равные части. Такая задача, посвященная выбору одного элемента из множества других при наименьшем числе испытаний, была рассмотрена Шенвоном. Такой двоичный выбор получил название *метода средней точки*.

Максимальное время обнаружения неисправности по методу проб, т.е. определение неисправностей всех элементов подряд:

$$T_n = k(N-1), \quad (2)$$

где k - средняя норма времени проведения одного испытания.

Максимальное число испытаний R при методе средней точки:

$$N = 2^R, \tag{3}$$

где R – число испытаний.

Время обнаружения неисправного элемента определяется из уравнения:

$$T_{ст} = kR. \tag{4}$$

Искомый выигрыш будет равен:

$$L = \frac{T_{п}}{T_{ст}}. \tag{5}$$

Чаще мы имеем случай, когда последовательно соединенные элементы системы имеют различную априорную вероятность отказа. При допущении равенства времени испытаний элементов $T_i = T_j$ оптимальная программа последовательности поиска неисправного элемента может быть определена следующим образом.

Условная вероятность того, что отказал i -й элемент при условии, что в системе произошел отказ только одного элемента, определяется по формуле:

$$q_i^* = \frac{q_i}{p_i} \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{q_k}{p_k}}, \tag{6}$$

где q_i - вероятность отказа i -го элемента,

p_i - вероятность безотказной работы i -го элемента.

Оптимальная последовательность поиска отказавшего элемента:

- для всех элементов системы определяются значения q_i^* ;
- первое испытание производится в точке, которая делит пополам сумму условных вероятностей;

- последующие испытания производятся аналогично предыдущему пункту: сумму условных вероятностей оставшихся под подозрением элементов делится пополам.

Рассмотрим следующий пример. Пусть система состоит из $N = 6$ элементов, поток возникновения отказов которых является простейшим. В табл. 1 приведены значения q_i^* , которые были определены по формуле (6).

Таблица 1

Данные для организации оптимального поиска

№	1	2	3	4	5	6
q_i	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
p_i	0,6	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9
q_i^*	0,44	0,07	0,17	0,07	0,17	0,07

На рис. 6 представлена оптимальная схема поиска неисправностей.

Первое испытание проводится между 2 и 3 элементами – в точке, которая делит сумму условных вероятностей на две примерно равные части 0,51 и 0,48.

Вторая проверка производится между 4 и 5 элементами, где оставшееся значение условной вероятности делится также пополам (0,25 и 0,24) и т.д.

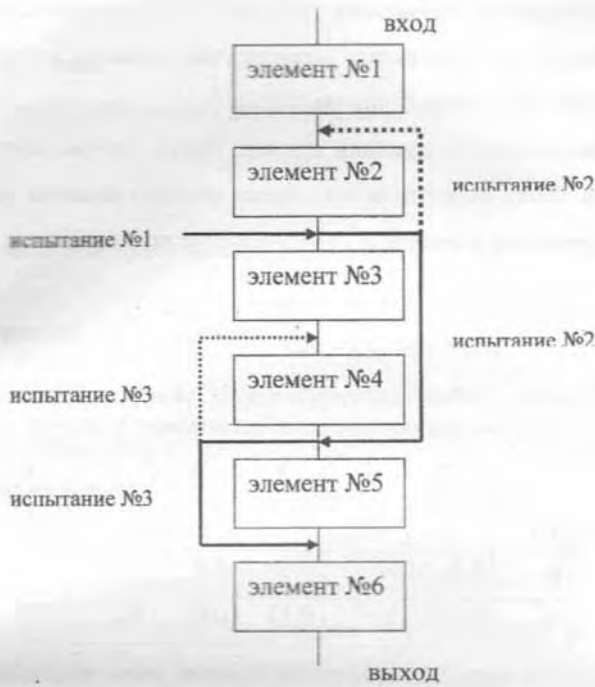


Рис. 6. Диаграмма реализации метода оптимального поиска неисправности

Если мы хотим минимизировать время поиска, то необходимо осуществлять проверку элементов в такой последовательности, которая для неравенства $1 \leq i \leq j \leq N$ удовлетворяет условию:

$$\frac{T_i p_i}{q_i} < \frac{T_j p_j}{q_j} \quad (7)$$

Вначале необходимо проверять элементы, для которых отношение времени проверки T_i к их надежности является минимальным.

Для определения оптимальной последовательности испытаний элементов имеющих различные значения времени проверки рассчитаем $T_i p_i / q_i$ для каждого элемента (табл. 2):

Таблица 2

Расчет для определения оптимальной последовательности испытаний элементов

№ элемента в системе	T_i	q_i	p_i	$T_i p_i / q_i$
1	0,2	0,3	0,7	0,47
2	0,15	0,2	0,8	0,6
3	0,22	0,4	0,6	0,33
4	0,17	0,3	0,7	0,4
5	0,07	0,2	0,8	0,28
6	0,14	0,4	0,6	0,29

На рис. 7 представлена диаграмма последовательности в которой необходимо осуществлять испытания элементов: 2-1-4-3-5 (элемент 6 проверять нет необходимости).



Рис. 7. Диаграмма оптимальной последовательности проведения испытаний элементов

- Основной задачей рациональной организации поиска дефекта является сокращение времени и средств, которые необходимо затратить на

поиск [1]. На рис. 8 представлена структурная схема ОД, которую необходимо протестировать.

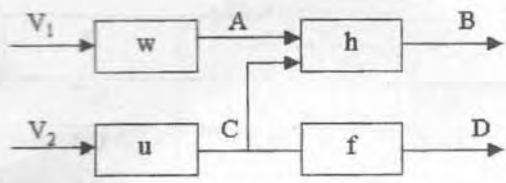


Рис. 8. Структурная схема ОД

Реализация теста заключается в подаче на вход элементов объектов диагностирования воздействий, имитирующих рабочие сигналы, и контроле реакций на эти сигналы. Система выводится из эксплуатации. Теоретической основой тестирования является Булева алгебра, т.е. предполагается, что исправному состоянию элемента соответствует наличие сигнала 1 на его выходе, а неисправному 0 – его отсутствие.

На основании схемы, представленной на рис. 8, составим таблицу неисправностей этой схемы (табл. 3), М обозначает множество всех возможных проверок, а Н – множество возможных состояний.

Таблица 3

Неисправности элементов

Проверка	Состояния объекта Н				
	1111	0111	1011	1101	1110
М					
М _А	1	0	1	1	1
М _В	1	0	0	0	1
М _С	1	1	1	0	1
М _Д	1	1	1	0	0

Из таблицы видно, что 5 возможных состояний ОД, определяемых состоянием элементов, оказываются полностью различными с помощью

четырёх проверок. Отказавшие элементы определяются соответственно кодовыми числами 0011, 1011, 1000, 1110. Очевидно, что с ростом числа элементов увеличивается число состояний ОД, а это усложняет задачу обнаружения неисправностей.

Глава 3. Математические модели систем диагностирования

Система переходит из одного состояния в другое в результате появления неисправностей. Когда неизвестны причины, есть возможность установить цепь событий, достоверность которых зависит от числа и качества наблюдений. В диагностике используют понятие «детерминированная модель». Особенностью таких моделей является единственность траекторий, определяющих однозначно связь работоспособности системы с характером ее неисправности [1].

Для случайных моделей оператор перехода учитывает вероятностные характеристики. Оператор здесь также имеет детерминированный характер, хотя он и не определяет достоверно траектории перехода системы из одного состояния в другое.

Состояние ОД в общем случае может быть описано n -мерным вектором:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — составляющие вектора.

Оператор перехода системы из состояния в состояние может быть описан матрицей:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где a_{ij} - коэффициент преобразования.

Модель дает возможность представить любые процессы в форме линейных и нелинейных преобразований. Если вектор X характеризует исходное состояние системы, то ее производное состояние для линейного преобразования вида:

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, \quad (i=\overline{1, n}) \quad (10)$$

может быть записано в виде:

$$X_{sp} = XA. \quad (11)$$

Для широкого класса систем, описываемых дифференциальными уравнениями, математическая модель будет иметь вид:

$$\frac{dX}{dt} = A(t)X + F(t), \quad (12)$$

$$X(0) = C, \quad (13)$$

где

$$F(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix},$$

где $F(t)$, C - n -мерные векторы;

$f_i(t)$ и c_i - составляющие $F(t)$ и C , соответственно.

Модель является наиболее общей для учета особенностей системы, поэтому конкретные модификации моделей необходимо рассматривать в соответствии со спецификой диагностируемых СУ.

Принципы, положенные в основу построения математических моделей непрерывных линейных систем, в полной мере справедливы для дискретных СУ. Дискретные системы, отличающиеся по назначению и по конструктивным особенностям, объединяются единой математической моделью, отображающей особенности определения работоспособности систем и поиска дефекта в них.

Получение самого решения связано с использованием информации, которая заложена в управлении, описывающем систему. Для рассматриваемых систем эта информация ограничена дискретными значениями контролируемой величины и определение решения в форме непрерывной функции, по существу, сводится к аппроксимации его с той или иной точностью. Следовательно, модель для дискретных систем можно рассматривать в виде некоторого аналога дифференциальных уравнений – в форме разностных уравнений. В матричной форме модель может быть представлена в виде:

$$X(t+1) = AX(t) + F(t), \quad (14)$$

где $t=0, 1, \dots$

Относительно независимой переменной $k=(x-x_0)/\Delta x$ (где Δx – фиксированное приращение) можно записать следующее:

$$X_{k+1} = AX + F(k). \quad (15)$$

Уравнение (15) тождественно системе линейных разностных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} x_{1,k+1} &= a_{11}x_{1k} + a_{12}x_{2k} + \dots + f_1(k) \\ x_{2,k+1} &= a_{21}x_{1k} + a_{22}x_{2k} + \dots + f_2(k) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из (15) и (16) следует $X_k = \{x_{1k}, x_{2k}, \dots\}$.

Рассмотрим математические модели систем диагностирования при случайных воздействиях. Такие модели свойственны определенному типу СУ. К ним относятся, прежде всего, системы со случайно изменяющимся управляющим сигналом, а также системы, в которых неисправности вызывают случайное изменение параметров работоспособности.

Согласно изложенным обстоятельствам, математическая модель работоспособности систем определяется дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dY_i}{dt} = F_i^j(t, Y_1, Y_2, \dots, Y_n, X_1, X_2, \dots, X_m, x_1, x_2, \dots, x_k, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l), \quad (17)$$

где t – время;

Y_1, Y_2, \dots, Y_n – компоненты векторной функции работоспособности – координаты системы, по которым производится оценка работоспособности;

X_1, X_2, \dots, X_m – функции времени, изменяющиеся по случайному закону и характеризующие случайные возмущающий и управляющий сигналы;

x_1, x_2, \dots, x_k – случайные величины, характеризующие значения параметров элементов системы при той или иной неисправности;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l$ – случайные возмущения, возникающие в системе при неисправности;

F_i^j – линейные и нелинейные функции соответствующих аргументов.

Математическая модель (17) включает в себя практически все ситуации, возможные при оценке влияния неисправностей на работоспособность ОД.

В соответствии с существующими способами упрощения математических моделей систем, модель в форме (17) может быть представлена в виде:

$$\frac{dZ}{dt} = \Phi_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_n, X_1, X_2, \dots, X_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k). \quad (18)$$

Переход к модели (18) выполнен в результате замены случайных начальных условий нулевыми при помощи линейного представления переменных в форме $Z_i = Y_i - Y_i(0)$ и приведения случайных функций $x_i(t)$ к выходу.

Случайная функция при анализе работоспособности СУ может рассматриваться как функция двух переменных – времени (t) и номера опыта (s), в котором наблюдается ее реализация:

$$X(t) = x(t, s). \quad (19)$$

Глава 4. Дефекты и методы их обнаружения

Наиболее частой причиной, по мнению многих специалистов, снижающей качество готовой продукции, являются скрытые дефекты и важную роль в проблеме повышения качества и надежности элементов СУ отводят неразрушающим испытаниям (НРИ) - дефектологии, науке о принципах, методах и средствах обнаружения дефектов.

Классификация методов обнаружения дефектов представлена в табл. 4.

Таблица 4

Классификация методов обнаружения дефектов

№	Метод диагностирования	Разновидности
1	Магнитопорошковый	С применением магнитной суспензии;
		С использованием воздушной извести ферромагнитного порошка
2	Капиллярный	Цветной
		Люминесцентный
		Люминесцентно-цветной
3	Электромагнитный	Вихретоковый импульсный
4	Акустический	Звуковой
		Ультразвуковой
		Импедансный
5	Радиационный	Рентгенографический
		Гаммаграфический
6	Тепловой	Пассивный
		Активный
		Контактные
		Бесконтактные

Для контроля дефектов в элементах системы управления (ЭСУ) используют две группы НРИ. Первую группу составляют методы *интегральной диагностики*, наиболее эффективными из них являются методы, основанные на измерениях шумовых характеристик, в том числе электрических и акустических шумов. Вторую группу составляют методы *локальной диагностики*. В настоящее время для контроля ЭСУ применяются общие и специальные методы НРИ. К общим методам относятся: визуальный контроль, испытание давлением, акустическая и

магнитная дефектоскопия, метод капиллярной дефектоскопии, радиография и метод вихревых токов.

К *специфическим методам НРИ* относятся: рентгеновские, голографические, тепловые, оптические и электрические методы.

Визуальный контроль наиболее широко распространенный метод НРИ. Используется для исследования поверхностных характеристик (повреждения, посторонние включения, расположение элементов и пр.).

Достоинства метода: простота, малые затраты времени и экономичность.

При *испытании давлением* дефекты обнаруживаются по проникновению газов или жидкости в полости дефектов или через эти дефекты [5].

Под *акустическими испытаниями* понимают звуковые, ультразвуковые, импедансные испытания.

Наиболее широко используется ультразвуковая спектроскопия. Метод основан на использовании явлений, связанных с дифракцией света. Т.е. метод основан на анализе процесса распространения возбужденных ультразвуковых волн в магнитных и немагнитных материалах, которые отражаются от дефектов в виде трещин, шлака, неметаллических включений. Информацией о дефекте служат амплитуда и местоположение эхо-сигнала. Метод звуковой спектроскопии используется для формирования изображения путем сканирования эхоимпульсом.

Достоинством метода является большая глубина обнаружения дефектов.

Недостатком метода является то, что объекты контроля сравнимы по размерам с пределами разрешения, из-за чего, как правило, получается некачественное изображение. Также большинство объектов контроля

взаимодействуют с ультразвуком сложным образом, из-за чего полученные изображения нуждаются в дополнительной расшифровке. [5].

Акустический импедансный метод необходим при диагностировании многослойных конструкций. Принцип метода заключается в различие механических импедансов (полное механическое сопротивление, т.е. отношение приложенной возмущающей силы F к скорости v колебаний частиц среды в точке приложения силы) дефектных и бездефектных элементов. Бездефектная конструкция под действием преобразователя колеблется как единое целое и механический импеданс максимален, в отличие от конструкции с дефектами. Это изменение можно измерить с помощью стрелочного прибора.

Достоинство метода – обнаружение дефектов в многослойной конструкции.

Недостаток – можно обнаружить дефект только со стороны установки преобразователя.

Метод капиллярной дефектоскопии основан на использовании проникающих, смазывающих красящих или люминесцентных жидкостей, которые светятся под действием ультрафиолетового излучения. Эти жидкости наносятся на очищенную поверхность детали, для заполнения узких мест [5]. Лишняя жидкость с поверхности удаляется, после этого необходимо нанести проявитель, который выглядит в виде специальной, белой краски или порошка. В результате чего выступающая из полостей жидкость окрашивает проявитель и образует хорошо видимый на белом фоне так называемый «индикаторный рисунок». Он дает информацию о нахождении, форме и протяженности дефекта.

Достоинства капиллярного метода: при использовании жидкости, окрашенной в красный цвет (цветной метод), рисунок виден при дневном свете; при использовании люминесцентных жидкостей, рисунок ярко

светится в ультрафиолетовых лучах; при использовании люминесцентно-цветного метода, рисунок виден и при дневном свете и при ультрафиолетовых лучах.

Недостатки метода: необходимость удаления защитных покрытий, большие затраты времени (1...3 ч), а также высокая трудоемкость.

Метод магнитной дефектоскопии основан на явлении искажения магнитного поля ферромагнитного испытуемого образца при наличии в нем дефектов [2, 5]. Этим методом определяют состояние большинства стальных деталей, снятых или не снятых с систем, к которым имеется доступ для намагничивания, осмотра и нанесения суспензии. На поверхность объекта наносят ферромагнитные частицы (у них собственное, внутреннее магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле), которые находятся во взвешенном состоянии в жидкости или в воздухе. Объект помещается в магнитное поле или пропускается ток по кабелю, который проходит через отверстие в объекте. Результатом метода должно быть следующее – если в объекте есть дефект, то образуется неоднородный магнитный поток. К месту дефекта стремятся ферромагнитные частицы под действием возникающей силы. Опять же, как и в предыдущем методе, информационным параметром является индикаторный рисунок, который выглядит в виде полосок осевшего на поверхности объекта порошка. Характер, и что не менее важно, размер дефекта можно оценить по количеству порошка и форме рисунка.

Применяется метод для определения неровностей, микротрещин 0,01...0,05 мм.

Достоинства метода - высокая чувствительность и точность, простота технологии, малые затраты времени.

Недостаток: необходимость удаления лакокрасочных покрытий толщиной более 0,03 мм.

Метод радиационный основан на просвечивании изделий рентгеновскими, γ - δ -лучами, нейтронами и другими элементарными частицами, что дает возможность получить информацию о внутреннем их состоянии. Т.е. метод основан на способности лучей проникать сквозь непрозрачные вещества и «высвечивать» неоднородности и дефекты структуры исследуемого объекта [2, 5]. В качестве регистратора дефектов можно использовать рентгеновскую пленку, флуоресцентный экран и т.п.

Достоинства радиационного метода: возможность определения взаимного положения внутренних деталей в агрегатах, наличие документа (рентгено-, гамма – снимков).

Недостатки метода: большие габариты аппаратуры и ее сложность, высокая стоимость, необходимость обеспечения защиты человека от вредного воздействия на его организм излучения.

Метод вихревых токов (электромагнитный) применяется для обнаружения аномалий электрической или магнитной проводимости, которые обусловлены различными механическими дефектами, неоднородностями, изменениями структуры и неправильной кристаллизации (отклонение в режиме термообработки). Все эти аномалии электропроводности, магнитной проводимости обнаруживаются по изменению полного сопротивления катушки, питаемой переменным током, электромагнитное поле которой служит источником вихревых токов, наводимых в испытуемом образце [5].

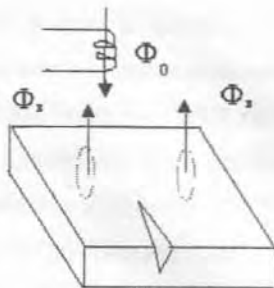


Рис. 9. Иллюстрация вихревого метода

Иллюстрация вихревого метода представлена на рис. 9. Под действием тока в катушке индуктивности образуется переменный магнитный поток Φ_0 , проникающий в металл. В результате чего в металле возникают вихревые токи, создающие свой магнитный поток Φ_e , который направлен навстречу возбуждающему потоку. За счет протекания вихревых токов происходит превращение электрической энергии в тепловую, что эквивалентно изменению индуктивности и активного сопротивления преобразователя. Их приращения, вызываемые вносимыми индуктивностью и сопротивлением, можно измерить. Трещина на поверхности (рис. 9) приводит к перераспределению вихревых токов, уменьшению их плотности, вследствие чего уменьшаются вносимые индуктивность и сопротивление, что может быть зарегистрировано средствами технической диагностики.

Достоинство метода: возможность диагностирования объектов с защитным покрытием.

Недостатки: отсутствует наглядность, большая трудоемкость, сложность определения размеров дефекта, требует однородности свойств материала.

Голографические методы используются в качестве как общих, так и специфических методов НРИ. Метод базируется на глубоком знании

физических процессов, протекающих в исследуемых образцах. Метод очень дорогостоящий, основан на применении компьютерной техники [4].

При *тепловых методах НРИ* получают информацию о параметрах и качестве изделий по распределению температуры на их поверхности в виде термограмм, которые позволяют судить о наличии скрытых дефектов. Метод основан на излучении электромагнитной энергии в инфракрасной области спектра любым телом, имеющим температуру, отличную от абсолютного нуля. Тепловые методы подразделяются на пассивные и активные.

Пассивные - это методы, позволяющие определять распределение температуры на поверхности изделия без применения специальных источников тепловой энергии (т.е. осуществляют контроль качества изделия без искажения электрических и тепловых характеристик изделия).

При *активных методах* имеется источник искусственного тепла, который воздействует на проверяемое изделие.

Тепловые методы делятся также на *контактные* и *бесконтактные*. В основном применяют *контактные методы*, к которым относится большинство методов НРИ:

- методы измерения температуры с помощью термопар;
- люминесцентные методы, основанные на измерении интенсивности свечения некоторых люминофоров под действием ультрафиолетового излучения;
- методы измерения температур с помощью термопар - чувствительных красок, изменяющих свой цвет при определенных температурных режимах;
- жидкокристаллические методы, основанные на использовании свойств жидкокристаллических соединений изменять окраску под воздействием температуры,

которые позволяют определять разность температур до 0.1°С.

Бесконтактные методы измерения температуры являются более перспективными и универсальными, они не вызывают искажения температурного поля изделий, мало инерционны, обладают высокой разрешающей способностью. Здесь наиболее перспективным является метод, сущность которого состоит в регистрации каким-либо способом инфракрасного излучения, исходящего от исследуемого объекта, без непосредственного механического контакта термоприемника с ним (фотография, приборы разного назначения)[4].

Электрические методы относятся к методам *интегральной диагностики*. Основаны на возможности оценки и прогнозирования работоспособности и величине характерных электрических параметров. Например, для контроля качества полупроводниковых приборов измеряют параметры вольтамперной характеристики.

Тонкопленочные конденсаторы (ТПК) проверяют на пробой диэлектрика, используют параметры, характеризующие надежность внутреннего поля в диэлектрике, рассматривают плотность объемного заряда, накапливаемого при приложении к ТПК постоянного напряжения вблизи микровыступов, т.е. в областях локализации поля.

К электрическим методам также относится метод контроля шумовых характеристик [4].

Глава 5. Диагностирование надежности СУ по уровню собственных шумов

Многие исследователи, занимающиеся надежностью систем, в ряде своих работ показали, что собственные шумы электровакуумных

приборов, резисторов, штепсельных разъемов, контактов реле и других элементов несут информацию об их надежности.

Физической основой метода прогнозирования отказов системы по их низкочастотным шумам (НЧ) является зависимость уровня шума от наличия дефектов структуры и контактов прибора. Основными источниками шума в электрических цепях и активных элементах являются [4, 5]:

- **тепловой шум:** существует в любом проводнике или полупроводнике, этот шум вызывается хаотическим тепловым движением носителей заряда;
- **дробовый шум:** этот шум возникает вследствие флуктуации концентрации носителей заряда за счет случайности процессов генерации и рекомбинации.

Многими исследователями отмечено, что тепловой и дробовый виды шумов прямо не связаны с дефектами приборов и не содержат дополнительной информации о потенциальной надежности исследуемого прибора.

- **НЧ шумы:** в литературе по надежности нет еще единой терминологии для данного вида шума; встречаются названия: фликкер-шум, шумы мерцания, избыточные шумы и НЧ шумы.

Причиной возникновения этого шума являются различные дефекты в структурах системы. Для этого вида шума обычно рассматривают спектральную плотность мощности этого шума. Отмечено, что коэффициент шума сильно зависит от сопротивления источника сигнала, что является недостатком этого параметра.

Многие исследователи отметили, что основные виды отказов систем прогнозируются по уровню их НЧ шумов, поэтому считается, что через характеристики НЧ шума можно получить показатели надежности систем.

В качестве прогнозирующего параметра можно использовать любую из рассматриваемых характеристик: эффективное напряжение шума, коэффициент шума, спектральную плотность мощности, функцию автокорреляции.

Отмечено, что функция автокорреляции и спектральная плотность мощности любого случайного процесса тесно взаимосвязаны и для получения данных об этом процессе (где отражаются наиболее полно физическая сущность и параметры этого процесса) достаточно измерить одну из этих характеристик. Но с точки зрения удобства измерений, в производственных условиях предпочтение отдается спектральной плотности мощности шума.

Для измерения НЧ шумов используют следующие методы.

- 1. Метод сравнения.** Исследуемый шум сравнивается с эталонным сигналом или шумом. В этом методе измеряются относительные величины и чаще всего метод применяют при измерении коэффициента шума;
- 2. Компенсаторный метод.**
- 3. Модуляционный метод.**

Оба последних метода дают высокую чувствительность и точность измерений, но реализуются только на высоких частотах. Применяют эти методы при исследовании тепловых и дробовых шумов;

- 4. Метод непосредственного измерения НЧ шума.** Метод основывается на получении спектральной плотности мощности шума на некоторой частоте через измерение эффективного напряжения шума при помощи высокочувствительного измерителя с известной полосой пропускания.

Малошумящий усилитель - наиболее важная часть установки, определяющей уровень собственных шумов. В настоящее время разработано достаточное количество схем малошумящих усилителей.

Исследования НЧ шумов различных элементов систем проводится давно. Но с каждым годом разрабатываются все новые элементы систем. Меняется подчас элементная база систем, создаются новые технологии производства и контроля систем. В настоящее время считается целесообразным автоматизировать процесс измерения и контроля параметров элементов систем для отбраковки непригодных элементов и сокращения времени контроля.

Предлагается, в целях повышения качества выпускаемой продукции предприятий электронной промышленности, разработать и внедрить автоматические системы управления технологическим процессом. В качестве одной из подсистем использовать контроль технологического процесса производства полупроводниковых элементов (ППЭ) (диоды, транзисторы, тиристоры, интегральные сборки и т. д.) по уровню НЧ шума. Считается, что этот метод универсален именно для ППЭ, т.к. все они состоят из различных структур с одним и более p-n переходами.

Глава 6. Диагностика ЭВМ и программного обеспечения

6.1. Особенности построения систем диагностирования ЭВМ

Выделим основные направления работ по повышению надежности устройств автоматики и вычислительной техники.

В первую очередь надежность устройств достигается за счет использования высоконадежных элементов. Внедрение полупроводниковых приборов вместо электровакуумных позволило повысить надежность устройств более чем на порядок за счет того, что физические

процессы в полупроводниковых приборах обеспечивают их функционирование при меньших питающих напряжениях, рассеиваемой мощности, и, следовательно, температурах.

Дальнейшим развитием элементной базы явилось создание интегральных схем (ИС). За последние годы ИС развивались бурными темпами и были созданы ИС малой, средней и большой степени интеграции. В настоящее время создаются сверхбольшие ИС, содержащие сотни тысяч элементов. Так как технология ИС непрерывно совершенствуется, то указанное обстоятельство привело к тому, что, несмотря на резкое увеличение числа элементов на одном кристалле надежность отдельного кристалла оставалась прежней, причем интенсивность отказов схемы, размещенной на кристалле, составляла примерно $10^{-6} - 10^{-8}$ 1/час [1].

Дальнейшее развитие элементов автоматики и вычислительной техники будет направлено по пути степени интеграции в ИС, использования оптических элементов, а также внедрение новых типов контактных соединений и др.

Особое внимание при создании устройств уделяется подбору стандартизованных и унифицированных элементов, использование, которых значительно повышает надежность, так как эти элементы отработаны наилучшим образом в схемном и технологическом отношении.

Вторым направлением повышения надежности элементов является обеспечение оптимальных режимов работы элементов. В первую очередь это касается электрических режимов.

6.2. Особенности технического диагностирования ЭВМ

ЭВМ является развитой структурой, содержащей большое число дискретных узлов и устройств, поэтому устройства автоматических систем можно рассматривать, как частный случай структур, входящих в состав ЭВМ [3]. Таким образом, основные положения диагностирования ЭВМ в полной мере могут быть перенесены на цифровые устройства, входящие в состав автоматических систем. К таким положениям относятся метод диагностирования (функциональное или тестовое), включение системы диагностирования (внешняя или встроенная система) и характер системы диагностирования (специализированная или универсальная). Поскольку специфика ЭВМ выражена более ярко, вопросы диагностирования будут рассматриваться в отношении вычислительных машин, при этом следует учесть, что принципы диагностирования в полной мере могут быть использованы для дискретных устройств автоматики.

Как и для любой технической системы все неисправности, возникающие в ЭВМ, можно классифицировать по длительности, внешнему проявлению и причинам возникновения. Определяющим в этом случае для выборов метода диагностирования и способов его реализации является разделение неисправностей на отказы и сбои.

В отношении отказов наиболее слабыми звеньями в ЭВМ являются электромеханические устройства, в частности устройства ввода-вывода, накопители на магнитные носители. На долю этих устройств приходится основная часть отказов, возникающих в ЭВМ. И хотя процесс поиска неисправности не отличается большой сложностью, время восстановления их значительно больше по сравнению с электронными устройствами, поскольку операции по замене износившихся узлов или деталей

трудоемки. В последнее время наметилась тенденция унификации ЭВМ. Не отрицая полезности этой тенденции, следует отметить, что в САУ по-прежнему будет необходимым использование специализированных ЭВМ. Все это вместе с разнообразием задач, решаемых однотипными машинами, заставляет использовать различные методы и средства диагностирования. В практике диагностирования в настоящий момент принято деление на программное, аппаратное и программно-аппаратное диагностирование. Диагностирование любого вида может производиться как в процессе (в оперативном режиме), так и во время технического обслуживания – вручную или автоматически. Аппаратура диагностирования может быть внешней или встроенной, причем и для первого и для второго типа могут быть использованы как специализированные, так и универсальные средства контроля.

6.3. Надежность и диагностика программного обеспечения

Повышение эффективности функционирования предприятий невозможно без внедрения современных методов управления, базирующихся на автоматизированных информационных системах (АИС) управления предприятиями. Одними из самых серьезных проблем программного обеспечения (ПО) АИС является его дороговизна и низкая надежность. Многие специалисты считают первый из этих недостатков продолжением второго. Поскольку программное обеспечение по самой своей природе ненадежно, его тестирование (диагностирование) и сопровождение требует постоянных, существенных расходов.

Надежность программного обеспечения есть вероятность его работы без отказов в течение определенного периода времени, рассчитанная с учетом стоимости для пользователя каждого отказа.

Можно сказать, что надежность программного обеспечения является функцией воздействия ошибок на пользователя системы, она не обязательно прямо связана с оценкой «изнутри» программного обеспечения. Даже крупный просчет в проектировании может оказаться не слишком заметным для пользователя. Но с другой стороны, даже на первый взгляд, незначительная ошибка, может привести к значительным последствиям.

Надежность не является внутренним свойством программы, она во многом связана с тем, как программа используется [8].

Надежность программного обеспечения можно сравнить с надежностью аппаратуры. Возможны следующие причины отказа устройства: ошибка проектирования, производственный дефект или просто сбой. Ошибка проектирования – это дефект, который с самого начала присутствует в каждом элементе. Эта ошибка такого рода, как например, часть памяти процессора оказывается недоступной из-за логической ошибки в проектировании схемы адресации. Производственный дефект – это ошибка, имеющаяся в одном или нескольких элементах из-за того, что эти конкретные элементы изготовлены неправильно. Например, производственные дефекты могут быть вызваны плохой пайкой или неправильным соединением проводов. Сбой – это дефекты, первоначально не присутствующие в элементе, но возникающие в процессе его функционирования вследствие некоторых физических явлений. Примерами сбоев могут быть физический износ переключателя вследствие трения, дающий перемежающийся отказ.

Надежность программного обеспечения существенно отличается от надежности аппаратуры. Программы не изнашиваются, поломка программы невозможна. Более того, производственные дефекты не имеют значения, так как они относительно редки и быстро обнаруживаются.

Следовательно, надежность ПО – следствие исключительно ошибок проектирования, т.е. ошибок, внесенных в процессе разработки. Сбои аппаратуры не зависят от обрабатываемых системой данных. Проявление ошибок в программе, напротив, в высшей степени зависит от входных данных. Такая ошибка обнаруживается в некоторый определенный момент именно потому, что в этот момент обрабатывается ранее не встречавшаяся последовательность входных данных. Частота сбоев аппаратуры существенно зависит от времени. Все физические устройства имеют некоторый срок службы, по истечении которого эта частота начинает быстро расти. Частота, с которой обнаруживаются ошибки в программном обеспечении, хотя иногда и кажется зависящей от времени, в действительности является функцией входных данных и состояния системы. Ошибки в программе проявляются как систематические, далеко не случайные события.

Для обеспечения надежности функционирования сложных программных комплексов необходимо идти по следующему пути:

1. Определять основные простейшие операторы, из которых составляются программы.

2. Более ответственно и скрупулезно изучать точность представления различных величин операторов.

3. Исследовать точные характеристики операторов при полученных распределениях величин.

4. Интенсивнее развивать модели исследования точных свойств элементарных операторов.

5. Составлять справочники по результатам исследования операторов, в которых приводить инженерные рекомендации по практической оценке точности операторов.

6. Разрабатывать точные модели сложных программ на основе интегрирования элементарных операторов. Для этого можно использовать разработанные графоаналитические методы и методы моделирования.

7. При построении сложных программ из отдельных операторов необходимо производить весьма тщательное согласование выходов операторов с входами последующих операторов, а именно, областей их задания. Невыполнение этого является источником дополнительных ошибок и потерь информации.

Основными причинами ошибок программного обеспечения являются:

- Большая сложность ПО, например, по сравнению с аппаратурой ЭВМ.
- Неправильный перевод информации из одного представления в другое на макро- и микроуровнях. На макроуровне (уровне проекта) осуществляется передача и преобразование различных видов информации между организациями, подразделениями и конкретными исполнителями на всех этапах жизненного цикла ПО. На микроуровне (уровне исполнителя) производится преобразование информации по схеме: *нужно получить информацию - запомнить - выбрать из памяти (вспомнить) - воспроизвести информацию (передать)*.

Источниками ошибок (угрозами надежности) программного обеспечения являются:

- *Внутренние*: ошибки проектирования, ошибки алгоритмизации, ошибки программирования, недостаточное качество средств защиты, ошибки в документации.

- **Внешние:** ошибки пользователей, сбои и отказы аппаратуры ЭВМ, искажение информации в каналах связи, изменения конфигурации системы.

Методы проектирования надежного программного обеспечения можно разбить на следующие группы:

- Предупреждение ошибок, методы, позволяющие минимизировать или исключить появление ошибки.
- Обнаружение ошибок, методы, направленные на разработку дополнительных функций программного обеспечения, помогающих выявить ошибки.
- Устойчивость к ошибкам, дополнительные функции программного обеспечения, предназначенные для исправления ошибок и их последствий, а также обеспечивающие функционирование системы при наличии ошибок.

Методы предупреждения ошибок концентрируются на отдельных этапах процесса проектирования программного обеспечения и включают в себя:

- Методы, позволяющие справиться со сложностью системы.
- Методы достижения большей точности при переводе информации.
- Методы улучшения обмена информацией.
- Методы немедленного обнаружения и устранения ошибок на каждом шаге (этапе) проектирования, не откладывая их на этап тестирования программы.

Сложность системы является одной из главных причин низкой надежности программного обеспечения и возможности обеспечения его диагностики [8].

В общем случае сложность объекта является функцией взаимодействия (количества связей) между его компонентами. В борьбе со сложностью ПО используются две концепции.

1. **Иерархическая структура.** Иерархия позволяет разбить систему по уровням понимания (абстракции, управления). Концепция уровней позволяет анализировать систему, скрывая несущественные для данного уровня детали реализации других уровней. Иерархия позволяет понимать, проектировать и описывать сложные системы.
2. **Независимость.** В соответствии с этой концепцией для минимизации сложности необходимо максимально усилить независимость элементов системы.

Это означает такую декомпозицию системы, чтобы её высокочастотная динамика была заключена в отдельных компонентах, а межкомпонентные взаимодействия (связи) описывали только низкочастотную динамику системы.

Методы обнаружения ошибок базируются на введении в программное обеспечение системы различных видов избыточности.

- **Временная избыточность.** Использование части производительности ЭВМ для контроля исполнения и восстановления работоспособности ПО после сбоя.
- **Информационная избыточность.** Дублирование части данных информационной системы для обеспечения надёжности и контроля достоверности данных.
- **Программная избыточность** включает в себя: взаимное недоверие - компоненты системы проектируются, исходя из предположения, что другие компоненты и исходные данные содержат ошибки, и должны пытаться их обнаружить; немедленное обнаружение и

регистрацию ошибок; выполнение одинаковых функций разными модулями системы и сопоставление результатов обработки; контроль и восстановление данных с использованием других видов избыточности.

Методы обеспечения устойчивости к ошибкам направлены на минимизацию ущерба, вызванного появлением ошибок, и включают в себя:

- обработку сбоев аппаратуры;
- повторное выполнение операций;
- динамическое изменение конфигурации;
- сокращенное обслуживание в случае отказа отдельных функций системы;
- копирование и восстановление данных;
- изоляцию ошибок.

Важным этапом жизненного цикла программного обеспечения, определяющим качество и надёжность системы, является тестирование. **Тестирование** - процесс выполнения программ с намерением найти ошибки. Этапы тестирования [6]:

- **Автономное тестирование**, контроль отдельного программного модуля отдельно от других модулей системы.
- **Тестирование связей**, контроль связей между частями системы (модулями, компонентами, подсистемами).
- **Тестирование функций**, контроль выполнения системой автоматизируемых функций.
- **Комплексное тестирование**, проверка соответствия системы требованиям пользователей.

- *Тестирование полноты и корректности документации*, выполнение программы в строгом соответствии с инструкциями.
- *Тестирование конфигураций*, проверка каждого конкретного варианта поставки (установки) системы.

Существуют две стратегии при проектировании тестов: тестирование по отношению к спецификациям (документации), не заботясь о тексте программы, и тестирование по отношению к тексту программы, не заботясь о спецификациях. Разумный компромисс лежит где-то посередине, смещаясь в ту или иную сторону в зависимости от функций, выполняемых конкретным модулем, комплексом или подсистемой.

Качество подготовки исходных данных для проведения тестирования серьёзно влияет на эффективность процесса в целом и включает в себя:

- техническое задание;
- описание системы;
- руководство пользователя;
- исходный текст;
- правила построения (стандарты) программ и интерфейсов;
- критерии качества тестирования;
- эталонные значения исходных и результирующих данных;
- выделенные ресурсы, определяемые доступными финансовыми средствами.

Однако, исчерпывающее тестирование всех веток алгоритма любой серьёзной программы для всех вариантов входных данных практически неосуществимо. Следовательно, продолжительность этапа тестирования является вопросом чисто экономическим [8].

Учитывая, что реальные ресурсы любого проекта ограничены бюджетом и графиком, можно утверждать, что искусство тестирования заключается в отборе тестов с максимальной отдачей.

Ошибки в программах и данных могут проявиться на любой стадии тестирования, а также в период эксплуатации системы. Зарегистрированные и обработанные сведения должны использоваться для выявления отклонений от требований заказчика или технического задания. Для решения этой задачи используется система конфигурационного управления версиями программных компонент, база документирования тестов, результатов тестирования и выполненных корректировок программ. Средства накопления сообщений об отказах, ошибках, предложениях на изменения, выполненных корректировках и характеристиках версий, являющиеся основными для управления развитием и сопровождением комплекса ПО и состоят из журналов:

- 1) предлагаемых изменений;
- 2) найденных дефектов;
- 3) утвержденных корректировок;
- 4) реализованных изменений;
- 5) пользовательских версий.

Предупреждение ошибок - лучший путь повышения надёжности программного обеспечения.

Для его реализации была разработана методика проектирования систем управления предприятиями, соответствующая спиральной модели жизненного цикла ПО. Методика предусматривает последовательное понижение сложности на всех этапах анализа объекта.

Подходы к оцениванию и повышению надёжности функционирования программного обеспечения требуют существенных затрат различного вида. Но его осуществление необходимо. Это обусловлено конечной точностью вычислений в современных и перспективных компьютерах и другими факторами, из которых наиболее весомым является лавинообразный рост сложности перспективных программ. Другого пути

нет, пока не будут созданы компьютеры с избыточностью, позволяющей организовать оперативный контроль и принятие решений в условиях влияния помех различного вида, адаптирующиеся по точности в процессе вычислений.

В области надежности системы достигнут уровень, когда уже создан ряд математических методов, позволяющих инженеру предсказывать надежность аппаратуры. Эти математические методы (главным образом в форме вероятностных моделей) широко применяются во многих областях. Так как теория надежности системы развита довольно хорошо, естественно, необходимо попытаться применить ее и к надежности программного обеспечения [7].

Из всех неизвестных параметров надежности программного обеспечения, вероятно, самым важным является число ошибок оставшихся в программе. Если бы разумная его оценка была известна при тестировании, это помогло решить вопрос, когда можно закончить процесс тестирования. Если знать число оставшихся ошибок в устанавливаемой системе, можно было бы оценить стоимость работ по сопровождению и определить уровень доверия к программе. Другие параметры, для которых желательно иметь оценки, - это надежность программы (вероятность, что программа будет выполняться в течение данного интервала времени, прежде чем обнаружится ошибка заданной степени серьезности) и среднее время между отказами программы [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов И.Н., Кривцов А.Н., Куценко Б.Н., Сулова О.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем. СПб.: Руда и металл, 2004. 167 с.
2. Бердичевский Б.Е. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1976. 296 с.
3. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков Основы теории надежности автоматических систем управления. Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ление). 1984. 208.
4. Жалуд В. Шумы в полупроводниковых устройствах. М.: Советское радио, 1977. 416с.
5. Калявин В.П. Основы теории надежности и диагностики. СПб.: Элмор, 1998. 172 с.
6. Липаев В.В. Надёжность программных средств. М.: СИНТЕГ, 1998. 232 с.
7. Липаев В.В. Обеспечение качества программного обеспечения. М.: СИНТЕГ, 2001. 370 с.
8. Майерс Г. Надёжность программного обеспечения. М.: Мир, 1980. 360 с.
9. Мартынов А.А., Долгополов Г.А. Основы теории надежности и диагностики/ НГАВТ. Новосибирск, 1999. 108 с.
10. Миллер Ю.Г. Физические основы надежности интегральных схем. М.: Советское радио, 1976. 320 с.
11. Шишенок Н. А., Репкин В. Ф., Бардинский Л. Л. Основы теории надежности. М.: Советское радио, 1964. 550 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	-
Глава 1. Основы технического диагностирования	-
<i>1.1. Общие сведения по технической диагностике СУ</i>	-
<i>1.2. Проблемы диагностирования</i>	10
<i>1.3. Методы повышения качества технической диагностики</i>	11
Глава 2. Обнаружение неисправностей в СУ	12
<i>2.1. Методика обнаружения неисправностей</i>	-
<i>2.2. Оптимизация поиска отказов</i>	21
Глава 3. Математические модели систем диагностирования	27
Глава 4. Дефекты и методы их обнаружения	31
Глава 5. Диагностирование надежности СУ по уровню собственных шумов	39
Глава 6. Диагностика ЭВМ и программного обеспечения	42
<i>6.1. Особенности построения систем диагностирования ЭВМ</i>	-
<i>6.2. Особенности технического диагностирования ЭВМ</i>	44
<i>6.3. Надежность и диагностика программного обеспечения</i>	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	55