Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Кафедра электроники

НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Конспект лекций для студентов специальности
5В071600 - Приборостроение

Алматы 2016

СОСТАВИТЕЛЬ: А.А. Копесбаева. [illegible] приборов и систем. Конспект лекций для студентов специальности 5В071600 – « Приборостроение». – Алматы: АУЭС, 2016, - 75 с.

Конспект лекций предназначен для студентов второго курса специальности 5В071600 – Приборостроение.

Ил.-28, табл.-4, библиогр-7 назв.

Рецензент: к.э.н., доцент, Аренбаева Ж.Г.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2016г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2016 г.

Введение

Конспект лекций предназначен для студентов второго курса специальности 5В071600 – Приборостроение. Включает в себя все вопросы рабочей программы. Конспект лекций может быть использован студентами этой специальности при написании диплома. Лекции включают в себя теоретические положения по теории надежности, обучение основным методам расчета надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем

1 Лекция №1. Основные положения теории надежности

Содержание лекции: термины и определения теории надежности.

Цель лекции: знакомство с основными понятиями теории надежности. Введение в теорию надежности. Основные термины и определения теории надежности.

1.1 Основные понятия и определения теории надежности.

Теория надежности – научная дисциплина, в которой изучаются методы обеспечения эффективности работы объектов (устройств, систем) в процессе эксплуатации.

Теория надежности (ТН) появилась в середине 40-х годов 20-века и использовалась для необходимых расчетов надежности систем управления и различных видов связи. Постепенно она нашла применение во многих областях человеческой деятельности (машиностроение, транспорт, строительство, энергетика, системы управления).

Технические средства и условия их работы становятся все более сложными. Количество элементов в отдельных видах устройств исчисляется сотнями тысяч. Если не принимать специальных мер по обеспечению надежности, то любое современное сложное устройство практически будет неработоспособным.

Наука о надежности развивается в тесном взаимодействии с другими науками. Прежде всего, она тесно связана с проектированием информационных систем и вопросами обеспечения их безопасности. Среди математических дисциплин, прежде всего наибольшее применение получили: теория вероятности; некоторые элементы дискретной математики; дифференциальные уравнения и интегральные исчисления.

В настоящее время теория надежности является самостоятельной научной дисциплиной.

Основные ее задачи: установление видов количественных показателей надежности; выработка методов аналитической оценки надежности; разработка методов оценки надежности по результатам испытаний; оптимизация надежности на стадиях разработки и эксплуатации технических систем.

1.2 Основные термины и определения.

Надежность - свойство объекта (системы) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Техническая система – совокупность элементов, взаимодействующих между собой в процессе выполнения заданных функций.

Элемент системы – составная часть любой системы, которая рассматривается без дальнейшего разделения как единое целое; внутренняя структура элемента не является предметом исследования.

Понятия «система» и «элемент системы» выражены одно через другое и часто условны: то, что является системой для решения одних задач, для других принимается элементом в зависимости от целей изучения, требуемой точности, уровня знаний о надежности и т.д.

С точки зрения надежности все технические системы делятся на два вида:

1) *Невосстанавливаемые элементы и системы,* т.е. неремонтируемые в процессе эксплуатации (радиоэлементы, интегральные схемы, часть приборов, аппаратура летательных аппаратов и т.д.).

2) *Восстанавливаемые элементы и системы,* которые могут быть отремонтированы непосредственно после отказа в заданное время.

Само понятие «восстановление» следует понимать не только как корректировку, настройку, пайку или иные ремонтные работы по отношению к тем или иным техническим средствам, но и замену этих средств.

Подавляющее большинство систем, применяющихся для автоматизации технологических процессов, как правило, подлежит восстановлению после отказа, после чего они вновь продолжают работу.

Работоспособность - такое состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, предъявляемым к его основным параметрам. К числу основных параметров технических систем относятся: быстродействие; нагрузочная характеристика; устойчивость и точность выполнения операций.

Комплекс других показателей технической системы: масса, габариты, удобство в обслуживании и др. могут изменяться с течением времени. Эти изменения имеют допустимые значения, их превышение может привести к возникновению отказного состояния (частичного или полного).

Состояния технической системы могут быть также разделены на: *исправное*, при котором система полностью соответствует всем требованиям нормативно-технической документации и конструкторской документации; *неисправное*, когда система имеет хотя бы одно несоответствие этим требованиям.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы, т.е. в переходе ее из работоспособного состояния в неработоспособное состояние, называется *отказом.*

Событие, заключающееся в переходе системы из исправного в неисправное (но работоспособное) состояние, называется *повреждением.*

Предельное состояние – возникает при условии, когда дальнейшее применение технической системы или оборудования невозможно или нецелесообразно.

После попадания в предельное состояние может следовать ремонт (капитальный или средний), в результате чего восстанавливается исправное состояние, или же систему окончательно прекращают использовать по назначению (физическое и моральное старение, износ).

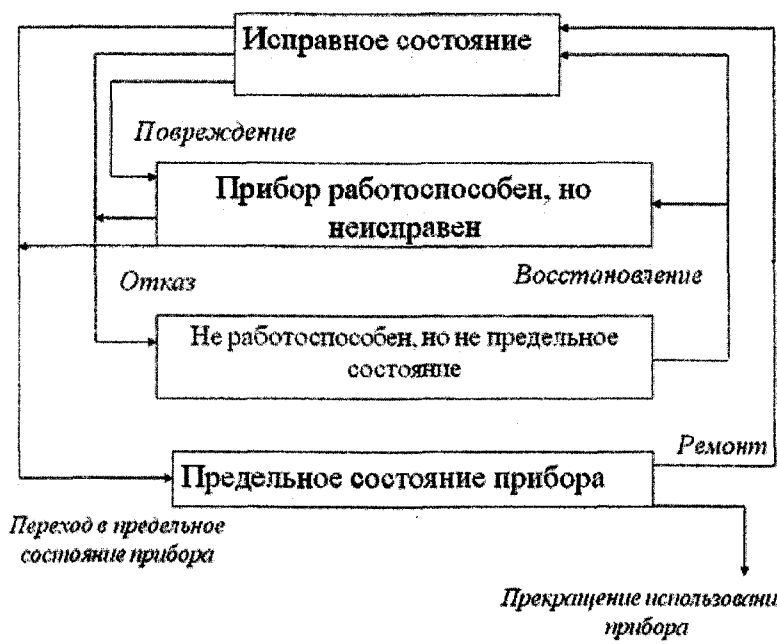


Рисунок 1 – Схема основных состояний и событий восстанавливаемой системы

1.3 Показатели надежности технических систем.

Показателями надежности называются количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность технических систем.

Надежность технических систем является комплексным свойством, включающим в себя четыре составляющие: безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость.

Безотказность – свойство системы сохранять работоспособность в течение требуемого интервала времени непрерывно без вынужденных перерывов.

Ремонтопригодность является свойством системы, заключающимся в ее приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Характеристики ремонтопригодности системы существенно зависят не только от свойств самой системы, но и от квалификации обслуживающего персонала и от организации ее эксплуатации.

Долговечность – свойство технической системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта, даже при экстремальных условиях.

Долговечность системы напрямую зависит от долговечности технических средств и от подверженности системы моральному старению.

Сохраняемость характеризуется свойством системы сохранять заданные значения показателей безотказности и ремонтопригодности в течение и после срока хранения и транспортировки.

Для технических средств и элементов это свойство имеет определенное значение, но оно менее важное, чем предыдущие свойства, так как эти средства транспортируются, как правило, один раз от завода до потребителя и этот срок незначительный.

2 Лекция №2. Надежность невосстаиавливаемых систем

Содержание лекции: порядок расчета надежности невосстанавливаемых систем.

Цель лекции: ознакомление с основными этапами расчета и показателями надежности невосстанавливаемых систем.

2.1 Основные этапы расчета надежности элементов и систем.

Задачей расчета надежности технических систем регулирования, контроля, защиты информации, объектов и дистанционного управления является определение показателей, характеризующих их безотказность и ремонтопригодность.

Расчет складывается из следующих этапов:

а) определение критериев и видов отказов системы и состава рассчитываемых показателей надежности;

б) составление структурной (логической) схемы, основанной на анализе функционирования системы, учете резервирования, восстановления, контроля исправности элементов;

в) выбор метода расчета надежности с учетом принятых моделей описания процессов функционирования и восстановления;

г) получение в общем виде математической модели, связующей определяемые показатели надежности системы с характеристиками ее элементов;

д) подбор данных по показателям надежности элементов системы;

е) выполнение необходимого расчета и анализ полученных результатов.

Содержание перечисленных этапов в значительной мере зависит от выбранных критериев отказов и рассчитанных показателей надежности систем.

В качестве элементов технических электронных и электрических систем могут выступать следующие блоки: измерительные; усиления; питания; регистрации; индикации; и другие. В состав технических систем входят механические (редукторы, рычажные передачи), электромеханические (реле, двигатели, трансформаторы), радиоэлектронные (резисторы, интегральные схемы, конденсаторы) и другие элементы, имеющие индивидуальные показатели надежности.

Составление структурной схемы, являющейся логической схемой расчета надежности как системы, так и отдельного технического средства, включает некоторые моменты, на которых необходимо остановиться отдельно. Структурная схема для расчета надежности существенно отличается от функциональной схемы. Структурной схемой для расчета надежности называется графическое отображение элементов системы, позволяющее однозначно определить состояние системы (работоспособное или неработоспособное) по состоянию ее элементов. При составлении схемы элементы могут соединяться последовательно или параллельно в зависимости от их влияния на работоспособное состояние системы. Если отказ элемента независимо от его назначения вызывает отказ системы, то элемент соединяется последовательно. Если отказ системы возникает при отказе всех или части однотипных элементов, то такие элементы соединяются параллельно. Последовательное соединение также называется основным, а параллельное резервным.

На рисунке 2.1 представлены функциональная и структурная схемы расчета надежности нормирующего преобразователя температуры, включающего блоки: измерительный *ИБ*, усилительный *УБ*, отрицательной обратной связи *БОС* и питания *БП*.

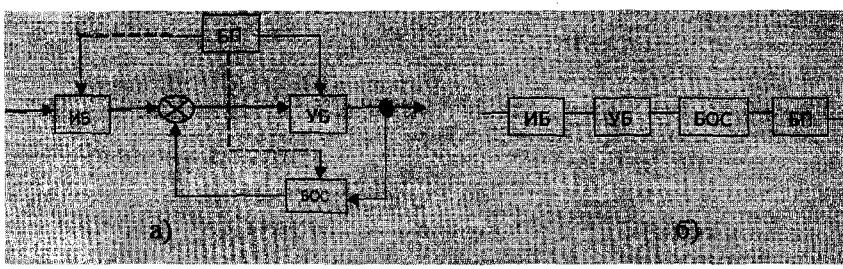


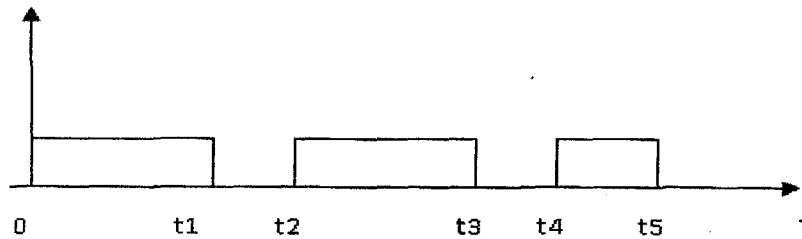
Рисунок 2.1- Функциональная схема (а) и структурная схема расчета надежности (б) нормирующего преобразователя

2.2 Невосстанавливаемые элементы и системы

Рассмотрим систему, начинающую работать в момент времени t=0, причем в этот момент система находится в работоспособном состоянии. Предположим, что такая система отключается только вследствие отказа. Обозначим через Т время, прошедшее от момента начала функционирования до момента отказа. Величина Т зависит от случайных отклонений технологических условий изготовления отдельных элементов от номинальных, различия условий транспортировки, монтажа, наладки и не будет одинаковой у различных систем даже при абсолютно одинаковых условиях эксплуатации. Сами условия эксплуатации отличны по температуре, степени вибрации, качеству технического обслуживания, частоте включения и т.д. По всем этим причинам понятно, что *Т – случайная величина.*

Отключения системы могут происходить не только из-за ее отказов, но и для проведения технического обслуживания и профилактики, из-за циклического графика технологического режима.

Продолжительность работы системы в этой ситуации носит название наработки, а случайная величина – длительность работы до отказа называется *наработкой до отказа*, которую также будем обозначать Т. Наработка до отказа в отличие от времени безотказной работы может измеряться числом включений, циклом и единицами времени. На рисунке 2.2 приняты следующие обозначения: t_1- момент отключения системы из-за останова технологического агрегата; t_2, t_4 - моменты включения системы в работу; t_3 - момент отключения системы на профилактику; t_5 - момент отказа системы.



$T = t_1 + (t_3 + t_2) + (t_5 - t_4)$ – *время до отказа системы.*

Рисунок 2.2 – Определение понятия наработка до отказа

Наработка до отказа является основной случайной величиной, характеризующей показатели надежности невосстанавливаемых систем. Невосстанавливаемыми называются элементы и системы, восстановление которых невозможно или нецелесообразно. Это элементы или системы, которые не ремонтируются в процессе эксплуатации (радиоэлементы, интегральные схемы, часть приборов, аппаратура летательных аппаратов и т.д.).

2.3 Показатели надежности невосстанавливаемых систем

При выборе показателей надежности следует иметь в виду, что эти показатели должны достаточно полно описывать надежностные свойства системы, быть удобными для аналитического расчета и экспериментальной проверки по результатам испытаний, должны иметь разумный физический смысл и, наконец, допускать возможность перехода к показателям эффективности.

Для невосстанавливаемых систем можно ограничиться показателями безотказности. *Безотказность* невосстанавливаемых технических систем является наиболее важной компонентой надежности систем, так как она отражает их способность длительное время функционировать без отказов.

Эта способность системы в решающей степени влияет на ее эффективность и определяется количеством и безотказностью элементов, режимом их работы, наличием резервирования, параметрами окружающей среды (температура, влажность, атмосферное давление и т. д.).

Показатели безотказности описывают системы, в принципе подлежащие восстановлению после отказов, но поведение которых целесообразно рассматривать до момента первого отказа. К их числу например, можно относить системы, чьи отказы чрезвычайно редки и вызывают особо тяжелые последствия.

Функция и плотность распределения наработки до отказа. Наработка до отказа обозначается символом T, как и любая иная случайная величина, описывается *функцией распределения* $F(t)$, определяемой как вероятность P (вероятность безотказной работы) случайного события, заключающегося в том, что наработка до отказа T меньше некоторой заданной наработки t (время).

$$F(t)=P\{T<t\}. \qquad (2.1)$$

Эта вероятность рассматривается как функция t во всем диапазоне возможных значений величины T.

Функция распределения любой случайной величины неубывающей функцией времени t. При величина $t\to\infty$ величина $F(t)$ стремится к единице.

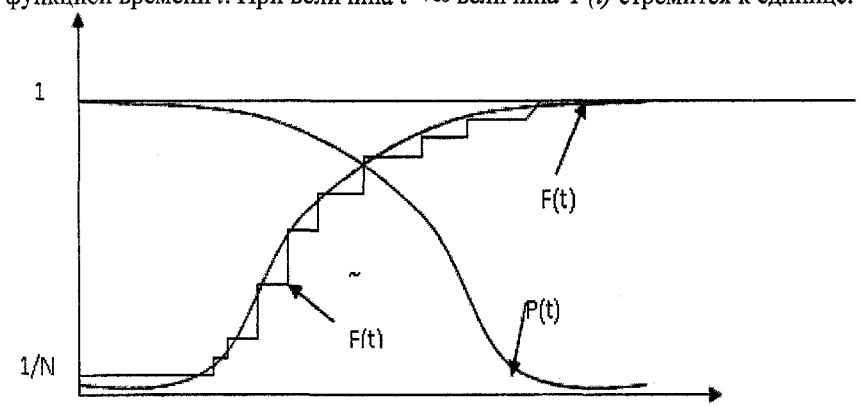


Рисунок 2.2 – Примерный вид функции распределения $F(t)$ и функции надежности $P(t)$

Кроме указанного (2.1) вероятностного определения функции $F(t)$, для *всех показателей надежности* можно привести и *статистические определения, используемые при испытаниях на надежность.* Статистические определения позволяют более полно объяснять смысл вероятностных определений. Далее статистические определения будем обозначать волнистой чертой.

Для рассмотрения статистических определений показателей надежности невосстанавливаемых систем предположим, что на испытание поставлено одинаковых систем, условия испытаний одинаковы, а испытания каждой из систем производятся до ее отказа. Обозначим N(t) число систем, отказавших к моменту времени t, т.е. на интервале (0,t). Очевидно, что N(0)=0, а при $t\to\infty$ величина $N(t)\to N$.

Статистическим определением функции распределения F(t) является функция:

$$\tilde{F}(t)=\tilde{N}(t)/N. \qquad (2.2)$$

График статистической функции распределения *F(t)* представляет собой ступенчатую линию со скачками кратными 1/N в моменты отказов (рисунок 2.2). С ростом количества испутуемых систем N статистическая функция распределения сравнивается с вероятностной.

Исправная работа технической системы и ее отказ в течение времени *t* являются несовместимыми противоположными событиями, поэтому введем еще одну функцию:

$$P(t)=P\{T>=t\}=1-F(t)\,, \qquad (2.3)$$

которую называют *функцией надежности*. Так как при P(0) = 0 система работоспособна, то P(0) =1. А с увеличением времени монотонно убывает, при величине P(0) = 0. Примерный вид функции надежности приведен на рисунке 2.2. *Статистическое определение функции надежности*:

$$\tilde{P}(t)= 1-\tilde{F}(t)=[N-\tilde{N}(t)]\,/\,N\,, \qquad (2.4)$$

где *N-N(t)* – число систем работоспособных к моменту времени t.

Функция распределения F(t), как правило, непрерывна, и существует непрерывная *плотность распределения наработки до отказа*, вероятностное определение которой:

$$f(t)=dF(t)/dt\ . \qquad (2.5)$$

Для статистического определения рассмотрим интервал времени (t-Δt/2,t+Δt/2), где Δt- длина этого интервала. Тогда *статистическое определение плотности распределения*

$$\tilde{f}(t)=\frac{N(t+\Delta t/2)-N(t-\Delta t/2)}{N*\Delta t}=\frac{N(t-\Delta t/2,\ t+\Delta t/2)}{N*\Delta t}\ . \qquad (2.6)$$

Если в формуле 2.1 и 2.2 зафиксировать время = t_1 , тогда вероятность отказа и безотказной работы имеет следующее вероятностное определение :

$$Q(t_1)=F(t1)=P\{T<t_1\};$$

$$P(t_1) = P\{T>=t_1\}.$$

Статистическое определение :

$$\tilde{Q}(t_1)=N(t_1)/N;$$

$$\tilde{P}(t_1) = 1-\tilde{Q}(t_1) = [N-N(t_1)] / N.$$

Для решения различных задач в качестве показателя надежности используется вероятность безотказной работы $P(t_1, t_2)$ системы на интервале (t_1, t_2) при условии, что система безотказно проработала до момента t_1. Вероятность события АВ – безотказной работы на интервале $(0, t_2)$ будет:

$$P\{AB\}=P\{A\}\times P\{B/A\}.$$

Отсюда

$$P(t_1,t_2) =P\{B/A\}=P\{AB\}/P\{A\} = P(t_2)/P(t_1) . \quad (2.7)$$

При описании надежности невосстанавливаемых систем широкое применение получила такая характеристика, как интенсивность отказов.

Интенсивность отказов определяется как условная плотность вероятности отказа системы в момент времени t при условии, что до этого момента они не возникали.

Выражает собой отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются исправными. Условная вероятность безотказной работы системы на интервале при условии, что система работоспособна в момент времени, определяется выражением (2.7)

$$P(t,t+\Delta t) = 1- P(t+\Delta t)/P(t) = -[P(t+\Delta t)-P(t)]/P(t).$$

Устремив время к нулю, получим вероятностное значение интенсивности отказов:

$$\lambda=lim\frac{1-P(t1,t+\Delta t)}{\Delta t} = \frac{dP(t)}{dt} \times \frac{1}{P(t)}. \quad (2.8)$$

Статистическое определение интенсивности отказов:

$$\lambda = \frac{\widetilde{f(t)}}{\widetilde{P(t)}} = \frac{N(t-\frac{\Delta t}{2},t+\frac{\Delta t}{2})}{\Delta t(N-N(t))}. \quad (2.9)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ дает наглядную картину изменения безотказности. Типичная зависимость во времени дана на рисунке 2.3. В период приработки выявляются скрытые дефекты изготовления отдельных элементов системы, недостатки монтажа, наладки, нарушения, произошедшие в результате транспортировки. Период эксплуатации характеризуется относительно постоянным показателем интенсивности отказов. В период

старения системы из-за износа отдельных элементов и изменения их характеристик интенсивность отказов возрастает.

Рисунок 2.3 – Типичный график изменения интенсивности отказов

Для решения значительного числа задач надежности технических систем достаточно знать только показатели, являющиеся числовыми характеристиками этой случайной величины. К ним относится в первую очередь относится *средняя наработка до отказа* (среднее время безотказной работы системы) – математическое ожидание (M[T]) случайной величины T – наработки системы (объектов) до первого отказа.

$$\tau = M[T] = \int_0^\infty t \times f(t)dt; \quad (2.10)$$

$$\tau = \int_0^\infty P(t)dt, \quad (2.11)$$

Из уравнения (2.11) следует, средняя наработка до отказа геометрически равна площади под кривой P(t) (рисунок 2.2). Статистическое определение наработки до отказа:

$$\tilde{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N}. \quad (2.12)$$

Показатель T важен в первую очередь для сложных систем с большим числом элементов.

Дисперсия и среднеквадратическое отклонение наработки до отказа:

$$D[T] = M[(t-\bar{\tau})^2] = \int_0^\infty (t-\bar{\tau})^2 f(t)dt = \int_0^\infty t^2 f(t)dt - \bar{\tau}^2; \quad (2.13)$$

$$\sigma[T] = \sqrt{D[T]}\ ; \quad (2.14)$$

$$\widetilde{D[T]} = \sum_{i=1}^{N} [(t_i - \bar{\tau})^2 / (N-1); \quad (2.15)$$

$$\tilde{\sigma}[T] = \sqrt{\tilde{D}[T]}\ . \quad (2.16)$$

Рассмотренные показатели применяются как при создании системы, так и при ее эксплуатации.

С помощью выбранного метода, исходя из структурной схемы системы, определяют аналитические модели, связывающие ее показатели с характеристиками элементов и процессов их обслуживания.

Подбор характеристик надежности элементов структурной схемы сопряжен с трудностями, определяемыми рядом факторов. К их числу относится зависимость показателей надежности от условий эксплуатации, которые могут существенно различаться на разных видах производств, поэтому паспортные данные по надежности могут не совпадать с их фактическими значениями.

Используя показатели надежности элементов невосстанавливаемых систем, по полученным математическим моделям производят расчет показателей надежность, который может быть выполнен с использованием соответствующих пакетов прикладных программ.

3 Лекция №3. Основные законы распределения наработки до отказа

Содержание лекции: показатели надежности с различными законами распределения.

Цель лекции: обучение принципам выбора основных законов распределения случайной величины наработки до отказа.

3.1 Экспоненциальное распределение

Непрерывная случайная величина – наработка системы до отказа может описаться различными законами распределения в зависимости от свойств системы и ее элементов, условий работы, характера отказов и множества других факторов.

Наибольшее распространение получило экспоненциальное (показательное) распределение, при котором функция распределения наработки до отказа.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \ , \qquad (3.1)$$

где λ - интенсивность отказов параметр этого распределения.

Функция $F(t)$, как правило, непрерывна, соответствующая плотность распределения

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \ . \qquad (3.2)$$

События, заключающиеся в наступлении или не наступлении отказа к моменту времени t, являются противоположными. $P(t)$ – вероятность безотказной работы. Если при $t = 0$ система работоспособна, то $P(0) = 1$.

С увеличением времени t, $P(t)$ будет монотонно убывать и приблизится к $P(t) = 0$, поэтому

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \qquad (3.2)$$

Вероятность отказа является обратной величиной вероятности безотказной работы системы, т.е.

$$Q(t1) = 1 - P(t1); \qquad (3.3)$$

$$Q(t1) = 1 - e^{-\lambda t_1} \ . \qquad (3.4)$$

При $\lambda_t << 1$, то есть при времени t, *намного меньшем* средней наработки до отказа $\tau = 1/\lambda$ выражение (3.2) можно упростить, заменив двумя первыми членами разложения в степенной ряд. Тогда, например, выражение (3.2) примет вид:

$$P(t) = 1 - \lambda_t = 1 - t/\tau \ , \qquad (3.5)$$

где τ- средняя наработка до отказа. Полученная при этом погрешность не превышает $0.5(\lambda_{t1})^2$.

Экспоненциальному распределению присуще одно характерное свойство: вероятность безотказной работы $P(t_1, t_2)$ в интервале (t_1, t_2) при условии, что в момент t_1 система работоспособна, вероятность $P(t)$зависит только от длины интервала $(t_1 - t_2)$ и не зависит от времени t_1 предшествующей работы системы, т.е. от ее «возраста». Средняя наработка до отказа, дисперсия и интенсивность отказов согласно их определениям:

$$\tau = 1/\lambda; \qquad (3.6)$$

$$D[T] = 1/\lambda^2; \qquad (3.7)$$

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) = \lambda \ . \qquad (3.8)$$

Так как для экспоненциального закона характерно постоянство интенсивности отказов λ= const, то область применения этого закона – системы и элементы, где можно не учитывать ни период приработки, ни участок старения и износа (многие средства вычислительной техники, приборостроения, элементы и системы регулирования). Экспоненциальное распределение хорошо описывает время безотказной работы сложных систем, состоящих из множества компонентов, поэтому расчеты надежности при применении этого распределения наиболее просты.

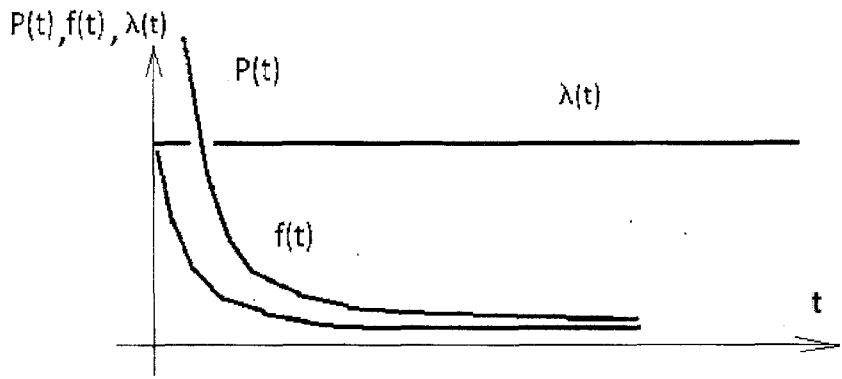


Рисунок 3.1 – Графики изменения показателей надежности при экспоненциальном распределении

3.2 Нормальное распределение

В отличие от экспоненциального распределения нормальное используется для описания таких систем и особенно их элементов, которые подвержены действию износа. При этом обязательно учитывается функция и плотность распределения наработки до отказа T, τ - средняя наработка до отказа.

Параметрами нормального распределения являются: m – математическое ожидание случайной величины; T – наработки до отказа (или времени безотказной работы); σ – среднеквадратическое отклонение наработки до отказа T по результатам испытаний систем.

Нормальное распределение описывает поведение случайных величин в диапазоне (- ∞, ∞), но т.к. наработка до отказа является не отрицательной величиной, чтобы это учесть, то вместо нормального в принципе должно использоваться усеченное нормальное распределение.

Область возможных значений случайной величины может быть от 0 до ∞ (0 при t=0). Усеченное нормальное распределение применят, если $m < 3\sigma$, в

противном случае использование более простого нормального (не усеченного) распределения дает достаточную точность.

Показатели надежности нормального распределения:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-(x-m)^2/(2\sigma^2)} dx;$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-m)^2/(2\sigma^2)};$$

$$\tau = m; D[T] = \sigma^2.$$

Рисунок 3.2 - Графики изменения показателей надежности при нормальном распределении

3.3 Распределение Вейбулла – Гнеденко

В теории надежности получило применение распределение Вейбулла – Гнеденко, описываемое функцией и плотностью распределения соответственно :

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t^k};$$

$$f(t)=\alpha k t^{k-1} e^{-\alpha t^k}. \quad (3.9)$$

Это двухпараметрическое распределение, где параметр k определяет вид плотности распределения отказов, параметр α- его масштаб. Так, при $k=1$ распределение Вейбулла – Гнеденко совпадает с экспоненциальным, когда интенсивность отказов постоянна. При $k>1$ интенсивность отказов монотонно возрастает. При $k<1$ монотонно убывает (рисунок 3.3).

Распределение Вейбулла – Гнеденко может быть применено для описания наработки до отказа электронных и механических технических средств, включая период приработки.

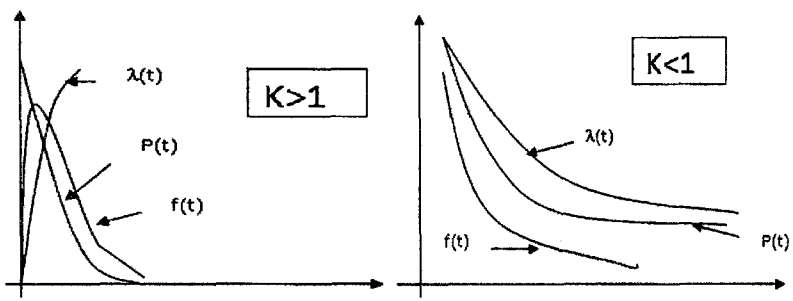


Рисунок 3.3 - Графики изменения показателей надежности при распределении Вейбулла – Гнеденко

4 Лекция №4. Надежность восстанавливаемых систем

Содержание лекции: порядок расчета надежности восстанавливаемых систем.

Цель лекции: обучение методам расчета показателей надежности восстанавливаемых систем.

4.1 Показатели надежности восстанавливаемых систем

Показатели безотказности. Для восстанавливаемых систем можно применять различные показатели надежности и безотказности.

При задании *потока отказов* как дискретного случайного процесса η *(t)* – числа отказов на интервале $(0,t)$ показателем безотказности является *параметр потока отказов* ώ (t), определяемый отношением числа отказов системы на некотором малом отрезке времени к значению этого отрезка:

$$\widetilde{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^{N}[n_i(t+\Delta t)-n_i(t)]}{N\Delta t}. \quad (4.1)$$

Средняя наработка на отказ – θ, в предположении, что наработка имеет одинаковое распределение с плотностью f(t) имеет следующее математическое выражение вероятностного показателя:

$$\theta = M[\varepsilon_i] = \int_0^\infty tf(t)dt \quad (i = 1,2 \ldots) . \tag{4.2}$$

В простейшем потоке параметр потока отказов ω и средняя наработка на отказ связаны соотношением θ=1/ω.

Для статистического определения средней наработки на отказ θ будем испытывать N одинаковых восстанавливаемых систем. Предположим, что каждая из них проработала в течение времени t. Тогда

$$\tilde{\theta} = \mathrm{Nt}/\sum_{i=1}^{N} n_i(t) . \tag{4.3}$$

Показатели ремонтопригодности. На практике продолжительность восстановления почти всегда существенно меньше времени между отказами, однако нельзя не учитывать продолжительность восстановления для решения многих задач надежности (например, расчета потерь из-за отказов, количества необходимого ремонтного персонала и др.).

Обозначим $T_в$ случайную величину – *продолжительность восстановления работоспособного состояния системы после отказа (время восстановления).*

Распределение величины $T_в$ не зависит ни от времени, ни от порядкового номера восстановления, ни от длительности предыдущего восстановления, ни от предшествующей наработки между отказами.

Функцию распределения величины $T_в$ обозначим $G(t)$, плотность распределения $g(t)$. Если наработки между отказами одинаково распределены и не зависят друг от друга и от величины $T_в$, то такой поток отказов с учетом времени восстановления носит название *альтернирующего процесса восстановления.* В этом процессе, как и в процессе восстановления, средняя наработка на отказ θ равна средней наработке до отказа τ.

График функционирования системы с учетом времени восстановления представлен на рисунке 4.1.

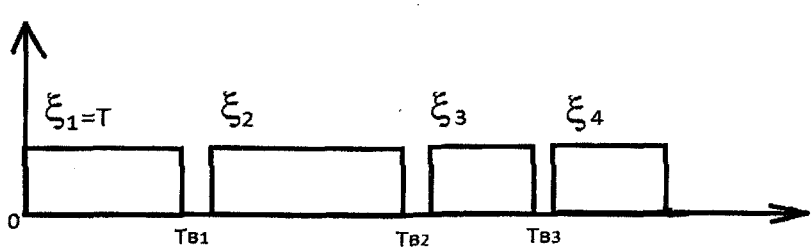


Рисунок 4.1 - График функционирования системы с учетом времени восстановления

Показателями ремонтопригодности также являются *вероятность восстановления работоспособного состояния за заданное время t_1 и среднее время восстановления* соответственно

$$G(t)= P\{T_в< t_1\};\quad \tau_в=M[T_в]\ . \tag{4.4}$$

Статистические определения этих показателей:

$$\tilde{G}\ (t_1)= l(t_1)/m;\qquad \widetilde{\tau_B} = \sum_{i=1}^{m} t_{Bi}/m\ , \tag{4.5}$$

где $l(t_1)$ – число восстановлений, длительность которых меньше t_1;
m – общее число восстановлений;
$t_{вi}$ – время восстановления после i-го отказа.

Показатели долговечности. Календарную продолжительность от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние (дальнейшее восстановление системы невозможно или нецелесообразно) называют *сроком службы системы.*

Срок службы системы может быть случайной величиной, которую обозначим T_c . Тогда в качестве показателя долговечности можно принять средний срок службы

$$t_c=M[T_c]\ . \tag{4.6}$$

или гамма - процентный срок службы t_γ, который определяется соотношением

$$P\{T_c > t_\gamma\} = \gamma/100. \tag{4.7}$$

Таким образом, t_γ - календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ (выраженной в процентах).

Для некоторых технических систем показателем долговечности является установленный срок службы, который должна достигнуть каждая система. Этот показатель можно интерпретировать как t_γ при γ = 100%.

В качестве случайной величины при рассмотрении долговечности может быть принят не только календарный срок службы, но и ее ресурс – наработка от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние.

Комплексные показатели надежности. Кроме приведенных выше показателей надежности восстанавливаемых систем, каждый из которых характеризует одну из составляющих надежности, используются также комплексные показатели, отражающие совместно безотказность и ремонтопригодность. К ним относятся: коэффициент готовности $k_г$, коэффициент оперативной готовности $k_{о.г}(t)$ и коэффициент технического использования $k_{т.и.}$.

Коэффициент готовности $k_г$ – вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации.

В альтернирующем процессе восстановления коэффициент готовности

$$k_г = \theta/(\theta + \tau_в). \tag{4.8}$$

Коэффициент готовности численно равен средней доле времени, в течение которого система пребывает в работоспособном состоянии. Поставлено на испытание N одинаковых восстанавливаемых систем, в произвольно выбранный, достаточно удаленный от начала момент времени t_x оказалось $N_p(t_x)$ работоспособных систем. Статистическое определение коэффициента готовности:

$$\widetilde{k}_г = N_p(t_x)/N. \tag{4.9}$$

Коэффициент оперативной готовности $k_{о.г}(t)$ – вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольно выбранный момент t времени в установившемся режиме эксплуатации и что, начиная с этого момента , система будет работать безотказно в течение заданного интервала времени t. В альтернирующем процессе восстановления

$$k_{о.г}(t) = \frac{\theta}{\theta+\tau_в} P(t_x, t), \tag{4.10}$$

где $P(t_x, t)$ – условная вероятность безотказной работы системы на интервале (t_x, t_x+t) при условии, что в момент времени t_x система была работоспособной.

Если распределение времени безотказной работы системы является экспоненциальным, то (4.10) можно упростить, учитывая свойство экспоненциального распределения: независимость вероятности безотказной работы на интервале $(t, t+\Delta t)$ от момента t. Тогда

$$k_{о.г}(t) = \frac{\theta}{\theta+\tau_в} e^{-\lambda t}. \tag{4.11}$$

При определении коэффициента готовности и коэффициента оперативной готовности исключены планируемые периоды времени, в течение которых применение систем по назначению не предусматривается (например, интервалы планового технического обслуживания).

Эти периоды учитываются коэффициентом технического использования - $k_{t.\ ч}$, где учитывается математическое ожидание суммарных времен пребывания системы в работоспособном состоянии, технического обслуживания и восстановления за некоторый период времени:

$$k_{т.и.} = \tau_{р\Sigma} / (\tau_{р\Sigma} + \tau_{т.о.\Sigma} + \tau_{в\Sigma}) , \qquad (4.12)$$

где $\tau_{р\Sigma}$,$\tau_{т.о.\Sigma}$, $\tau_{в\Sigma}$ – соответственно математические ожидания суммарных времен пребывания системы в работоспособном состоянии, технического обслуживания, восстановления за некоторый период эксплуатации Σ.

5 Лекция № 5. Методы расчета надежности по различным структурным схемам

Содержание лекции: рассматриваются три основных метода расчета надежности мостиковых схем.

Цель лекции: изучение методов расчета надежности невосстанавливаемых систем при различных сложностях структурной схемы расчета надежности.

5.1 Методы расчета надежности невосстанавливаемых систем

При расчете вероятности безотказной работы, средней наработки до первого отказа элементы системы рассматриваются как невосстанавливаемые. В этом случае при основном (последовательном) соединении элементов (рисунок 5.1) вероятность безотказной работы вычисляется как произведение вероятностей всех элементов:

$$P_c(t) = P_1(t)\, P_2(t) \ldots P_{n-1}(t)\, P_n(t) = \prod_1^n p_i(t). \qquad (5.1)$$

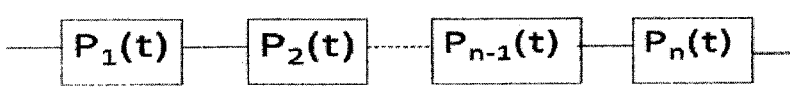


Рисунок 5.1 – Структурная схема расчета надежности, последовательное соединение элементов

При резервном (параллельном) соединении элементов (рисунок 5.2) и при условии, что для работы системы достаточно работы одного из включенных параллельно элементов, отказ системы является совместным событием, имеющим место при отказе всех параллельно включенных элементов. Если параллельно включено элементов и вероятность отказа каждого, то вероятность отказа этой системы:

$$Q_c(t) = Q_1(t)\, Q_2(t) \ldots . Q_{m-1}(t)\, Q_m(t) = \prod_{j=1}^{m} q_j(t). \quad (5.2)$$

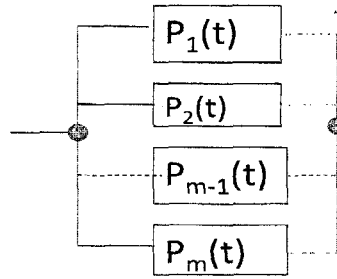


Рисунок 5.2 – Структурная схема расчета надежности, параллельное соединение элементов

Если структурная схема надежности состоит из последовательно-параллельного соединения, то расчет надежности использует формулы (5.1) и (5.2). Например, на рисунке 5.3 представлена схема, а уравнение 5.3 демонстрирует расчет функции надежности для этой схемы.

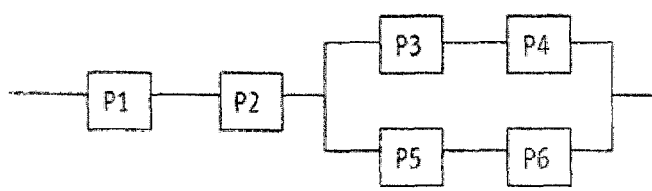


Рисунок 5.3 – Структурная схема расчета надежности, смешанное соединение элементов

$$Pc(t) = P1(t)*P2(t)*P3456(t) =$$

$$= P1(t)*P2(t)*\{1-[1-P3(t)*P4(t)][1-P5(t)*P6(t)]\}. \quad (5.3)$$

Однако, не все структурные схемы расчета надежности могут быть сведены к последовательно-параллельному соединению. На рисунке 5.4 представлена одинарная мостиковая схема расчета надежности.

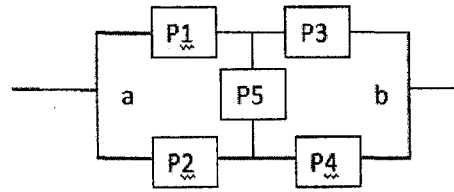


Рисунок 5.4 – Мостиковая схема соединения элементов

Для всех элементов схемы известны вероятности безотказной работы P_1,P_2,P_3,P_4,P_5 и соответствующие им вероятности отказа типа «обрыв» q_1,q_2,q_3,q_4,q_5. Необходимо определить вероятность наличия цепи между точками a и b схемы 5.4.

5.2 Метод перебора состояний

Расчету надежности любой системы независимо от используемого метода предшествует определение двух непересекающихся множеств состояний элементов, соответствующих работоспособному и неработоспособному состояниям системы. Каждое из этих состояний характеризуется набором элементов, находящихся в работоспособном и неработоспособном состояниях.

Поскольку при независимых отказах вероятность каждого из состояний определяется произведением вероятностей нахождения элементов в соответствующих состояниях, то при числе состояний, равном m, вероятность работоспособного состояния системы определяется выражением:

$$P = \sum_{j=1}^{m} \prod_{lj} p_l \prod_{kj} q_k. \qquad (5.1)$$

Вероятность отказа: $Q = 1 - \sum_{i=1}^{m} \prod_{lj} p_l \prod_{kj} q_k$, (5.2)

где m – общее число работоспособных состояний, в каждом j-м из которых число исправных элементов равно lj, а вышедших из строя - kj.

При сравнительно простой структуре системы применение метода перебора состояний сопряжено с громоздкими выкладками. Например, для схемы на рисунке 5.4 составим таблицу состояний, переводя сначала по одному, затем по два, по три элемента в неработоспособное состояние, сохраняя работоспособное состояние системы.

Таблица 5.1

№ состояния	Состояние элементов					Вероятность состояний
	1	2	3	4	5	
1	+	+	+	+	+	P_1,P_2,P_3,P_4,P_5
2	-	+	+	+	+	q_1, P_2,P_3,P_4,P_5

3	+	-	+	+	+	P_1, q_2, P_3, P_4, P_5
4	+	+	-	+	+	$P_1, P_2, q3, P_4, P_5$
5	+	+	+	-	+	P_1, P_2, P_3, q_4, P_5
6	+	+	+	+	-	P_1, P_2, P_3, P_4, q_5
7	-	+	-	+	+	$q_1, P_2, q3, P_4, P_5$
8	-	+	+	-	+	$q_1, P_2, P3, q_4, P_5$
9	-	+	+	+	-	$q_1, P_2, P3, P_4, q5$
10	+	-	-	+	+	$P_1, q2, q3, P_4, P_5$
11	+	-	+	-	+	$P_1, q2, P_3, q_4, P_5$
12	+	-	+	+	-	$P_1, q2, P_3, P_4, q_5$
13	+	+	-	+	-	$P_1, P_2, q3, P_4, q_5$
14	+	+	+	-	-	P_1, P_2, P_3, P_4, P_5
15	-	+	-	+	-	$q_1, P_2, q3, P_4, q_5$
16	+	-	+	-	-	$P_1, q2, P_3, q_4, q_5$

Если все элементы системы равнонадежны, то вероятность безотказной работы системы при p_i=0,9:

$$P_c = \sum_{j=1}^{16} \prod_{lj} p_l \prod_{kj} q_k = p^5+5p^4q+8p^3q^2+2p^2q^3 = 0{,}978.$$

5.3 Метод разложения относительно особого элемента

Этот метод основан на использовании формулы полной вероятности. В сложной системе выделяется особый элемент, все возможные состояния H_i которого образуют полную группу, $\sum_{i=1}^{n} P\{Hi\} = 1$. Если анализируемое состояние системы A, то его вероятность безотказной работы:

$$P\{A\} = \sum_{i=1}^{n} P\{Hi\}P\{A/Hi\} = \sum_{i=1}^{n} P_i\{A\}, \qquad (5.3)$$

где, второй сомножитель определяет вероятность состояния A при условии, что особый элемент находится в состоянии H_i.

Рассмотрение H_i – го состояния особого элемента позволяет упростить структурную схему надежности системы и свести ее к последовательно-параллельному соединению элементов.

Так, в рассматриваемой мостиковой схеме выделение элемента 5 в качестве особого с двумя возможными состояниями (1 наличие и 2 отсутствие цепи) $P\{H1\}=p_5$; $P\{H2\}=q_5$ позволяет от структурной схемы, представленной на рисунке 5.4 перейти при безусловно исправном состоянии элемента 5 к схеме, представленной на рисунке 5.5,а. При отказе элемента 5 структурная схема имеет вид, представленный на рисунке 5.5,б.

Выделение особого элемента с последующим анализом упрощенных структурных схем существенно сокращает выкладки.

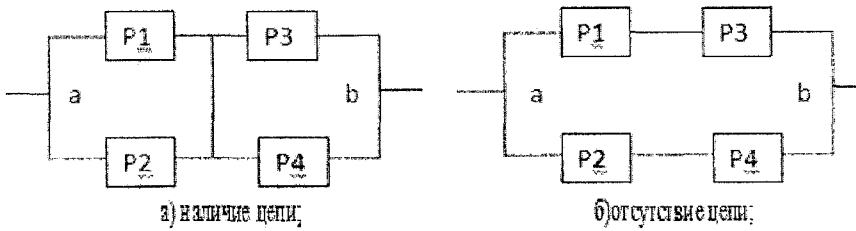


Рисунок 5.5 – Структурная схема

В соответствии с 5.3 имеем:

$$P_1\{A\}=p_5(1-q_1q_2)(1-q_3q_4)=0{,}882;$$

$$P_2\{A\}=q_5[1-(1-p_1p_3)(1-p_2p_4)]=0{,}0964;$$

$$P\{A\}=P_1\{A\}+P_2\{A\}=p_5(1-q_1q_2)(1-q_3q_4)+q_5(p_1p_3+p_2p_4-p_1p_2p_3p_4)=0{,}978.$$

5.4 Метод минимальных путей и сечений

В ряде случаев для анализа надежности сложной системы бывает достаточным определить граничные оценки надежности сверху и снизу.

При оценке вероятности безотказной работы сверху определяют минимальные наборы работоспособных элементов (путей), обеспечивающих работоспособное состояние системы.

При формировании пути считаем, что все элементы находятся в неработоспособном состоянии, последовательным переводом элементов в работоспособное состояние производим подбор вариантов соединений элементов, обеспечивающих наличие цепи.

Набор элементов образует минимальный путь, если исключение любого элемента из набора приводит к отказу пути. Из этого вытекает, что в пределах одного пути элементы находятся в основном соединении, а сами пути включаются параллельно.

Для мостиковой схемы (рисунок 5.4) набор минимальных путей представлен на рисунке 5.6.

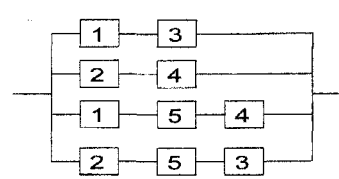


Рисунок 5.6 - Набор минимальных путей

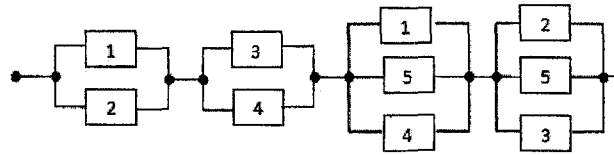


Рисунок 5.7- Набор минимальных сечений

Поскольку один и тот же элемент включается в два параллельных пути, то в результате расчета получается оценка безотказности сверху:

$$P_в = 1-Q_{13}Q_{24}Q_{154}Q_{253} = 1-(1-p_1p_3)(1-p_2p_4)(1-p_1p_5p_4)(1-p_2p_5p_3) = 0{,}997. \quad (5.4)$$

При определении минимальных сечений осуществляется подбор минимального числа элементов, перевод которых из работоспособного состояния в неработоспособное вызывает отказ всей системы.

При правильном подборе элементов сечения возвращение любого из элементов в работоспособное состояние восстанавливает работоспособное состояние системы.

Поскольку отказ каждого из сечений вызывает отказ системы, то первые соединяются последовательно. В пределах каждого сечения элементы соединяются параллельно, так как для работы системы достаточно наличия работоспособного состояния любого из элементов сечения.

Схема минимальных сечений для мостиковой схемы приведена на рисунке 5.7.

Поскольку один и тот же элемент включается в два сечения, то полученная оценка является оценкой снизу

$$P_н = p_{12}p_{34}p_{154}p_{253} = \geq(1-q_1q_2)(1-q_3q_4)(1-q_2q_5q_3) = 0{,}978. \quad (5.5)$$

В рассматриваемом примере оценка безопасности снизу совпадает с фактической безотказностью, рассчитанной по первым двум методам.

Таким образом, при составлении минимальных путей и сечений любая система преобразуется в структуру с параллельно - последовательным или последовательно - параллельным соединением элементов.

6 Лекция №6. Основные понятия о резервировании

Содержание лекции: рассматриваются основные способы повышения надежности.

Цель лекции: изучение основных способов повышения надежности за счет резервирования.

6.1 Виды резервирования

Для повышения надежности систем и элементов применяют резервирование, основанное на использовании того или иного вида избыточности.

Избыточность определяет следующие разновидности резервирования: функциональное, временное, информационное, структурное.

В этом случае, если различные системы или устройства выполняют близкие функции, осуществляется *функциональное резервирование.* Такое резервирование часто применяют для многофункциональных систем. Например, значение температуры пара на выходе котлоагрегата может быть определено по показаниям потенциометра, осуществляющего в комплекте с термоэлектрическим преобразователем индивидуальный контроль ответственного параметра, и с помощью вызова этого параметра на электронное табло информационно-измерительной системы, осуществляющей расчет технико-экономических и других показателей.

Временное резервирование заключается в том, что допускается перерыв функционирования системы или устройства из-за отказа элемента. Во многих случаях временное резервирование, обеспечивающее непрерывность технологического процесса, осуществляется за счет введения аккумулирующих емкостей, складов сырья и полуфабрикатов. Например, кратковременный перерыв в подаче топлива не приведет к прекращению генерации пара из-за аккумуляции теплоты поверхностям нагрева котлоагрегата.

Информационное резервирование связано с возможностью компенсации потери информации по одному каналу информацией по другому каналу.

На большинстве технологических объектов, благодаря внутренним связям имеет место информационная избыточность, которая часто используется для оценки достоверности информации.

Например, усредненный расход пара на выходе котла соответствует усредненному расходу воды на его выходе, расход газа на котле определяет расход воздуха при фиксированном составе дымовых газов.

Для локальных систем наиболее характерно *структурное резервирование.* При этом виде резервирования повышение надежности достигается путем введения дополнительных элементов в структуру системы.

6.2 Структурное резервирование

Структурное резервирование разделяют на общее и поэлементное (раздельное). При общем резервировании система или устройство резервируется в целом, при поэлементном резервируются отдельные элементы или их группы.

Если резервные элементы функционируют наравне с основными элементами, то имеет место постоянное резервирование, являющееся

пассивным. Если резерв вводится в состав системы после отказа основного элемента и сопровождается переключающимися операциями, то имеет место резервирование замещением – активное резервирование.

Схемы общего постоянного (а) и общего резервирования замещением (б) приведены на рисунке 6.1.

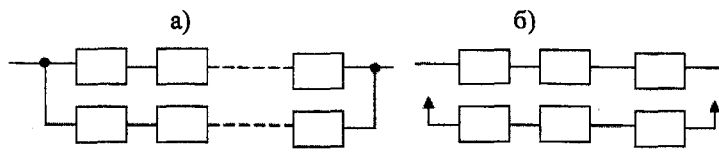


Рисунок 6.1 - Схемы общего резервирования

При поэлементном способе резервирования (рисунок 6.2 а- постоянном, б - замещением) резервные элементы могут находиться в нагруженном, облегченном и ненагруженном состоянии.

При нагруженном (горячем) резерве интенсивность отказов основного $\lambda_о$ и резервного $\lambda_н$ элементов одинакова, $\lambda_о = \lambda_н$. У облегченного (теплого) резерва интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_{об}$ ниже, чем у основных работающих, $\lambda_о > \lambda_{об}$.

При ненагруженном (холодном) резерве вероятностью отказов элементов в состоянии резерва можно пренебречь, $\lambda_х = 0$.

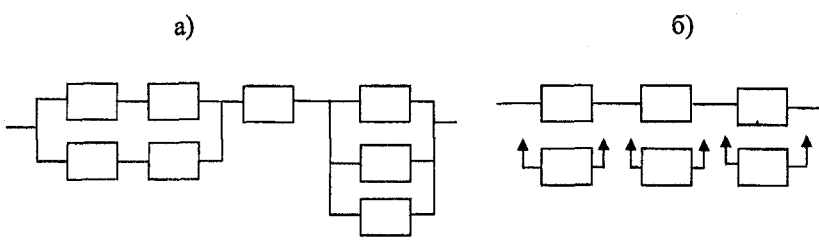


Рисунок 6.2 – Схемы поэлементного резервирования

При резервировании замещением один и тот же резерв может быть использован для замены любого из ряда однотипных элементов. Такой способ резервирования называют *скользящим* или с *неоднозначным соответствием*.

В подсистемах автоматизированных систем управления широко используются все рассмотренные способы резервирования. В локальных системах в основном применяют поэлементное (рисунок 6.2,б) резервирование замещением с ненагруженным резервом.

Отказавшие первичные и вторичные приборы, регулирующие блоки и блоки управления, исполнительные механизмы заменяют исправными (со склада).

Для характеристики соотношения между общим числом однотипных элементов n и числом r, необходимых для функционирования системы работающих элементов, вводится понятие кратности резервирования

$$k = (n - r)/r. \qquad (6.1)$$

Значение k может быть целым, если $r = 1$, и дробным, если $r > 1$. В этом случае дробь нельзя сокращать.

Скользящее резервирование является разновидностью *резервирования с дробной кратностью.* Если структурное резервирование сопряжено с дополнительными затратами на резервные элементы, то они должны окупаться за счет повышения надежности системы и снижения потерь от ее отказов.

Наиболее простыми показателями эффективности резервирования является следующее выражение:

$$B_\tau = \tau_p/\tau;\ B_p = P_p/P;\ B_Q = Q/Q_p\,, \qquad (6.2)$$

где B_τ – выигрыш за счет повышения средней наработки до отказа резервированной системы τ_p по сравнению с наработкой нерезервированной системы τ;

B_p и B_Q – аналогичные показатели по повышению вероятности безотказной работы и снижению вероятности отказа.

Резервирование эффективно, если значение показателей B_p, B_Q и B_τ больше единицы.

7 Лекция №7. Сложные виды резервирования

Содержание лекции: продолжение предыдущей лекции, методы повышения надежности за счет резервирования.

Цель лекции: обучение методам расчета надежности невосстанавливаемых систем с постоянным резервом.

7.1 Общее постоянное резервирование с целой кратностью

Вероятность отказа Q_p параллельно работающих m элементов при $r = 1$ определяется выражением (6.3), откуда для равнозначных элементов

$$Q_p = q^m = q^{k+1};\ B_Q = q/q^m = 1/q^k\,. \qquad (7.1)$$

Чем меньше вероятность отказа каждого из элементов, тем выше эффективность постоянного резервирования. Так, если $q=0,1$ и 0,01, а $k = 1$, то выигрыш в снижении вероятности отказа при резервировании составит соответственно 10 и 100. Рассмотрим связь показателей надежности группы резервированных элементов, кратности резервирования и длительности работы элементов при экспоненциальном законе распределения времени их безотказной работы. Если интенсивность отказов каждого из элементов равна $(1-e^{-\lambda t})$, то имеем:

$$Q_p(t) = F_p(t) = (1-e^{-\lambda t})^{k+1};$$

$$P_p(t) = 1-(1-e^{-\lambda t})^{k+1};$$

$$f_p(t) = (k+1)\lambda(1-e^{-\lambda t})^k e^{-\lambda t};$$

$$\lambda_p(t) = f_p(t)/P_p(t) = (k+1)\lambda(1-e^{-\lambda t})^k e^{-\lambda t} /$$

$$[1-(1-e^{-\lambda t})^{k+1}];$$

$$\lim_{t\to 0} \lambda_p(t) = 0; \quad \lim_{t\to\infty} \lambda_p(t) = \lambda = 1/\tau.$$

Постоянное резервирование эффективно на начальном участке работы системы, когда $t \le \tau$. Для группы резервных элементов средняя наработка до отказа:

$$\tau_p = \int_0^\infty P_p(t)dt = \int_0^\infty [1-(1-e^{-\lambda t})^{k+1}]dt.$$

Подставив $1-e^{-\lambda t} = z; dt = dz/[\lambda(1-z)]$, получим под знаком интеграла сумму первых k+1 членов убывающей геометрической прогрессии:

$$\tau_p = \frac{1}{\lambda}\int_0^1 \frac{1-z^{k+1}}{1-z}dz = \frac{1}{\lambda}\int(1+z+z^2 \ +...+z^k)dz =$$

$$= \frac{1}{\lambda}(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+...+\frac{1}{k+1}) = \tau\sum_{i=1}^{k+1}\frac{1}{i}.$$

Из последнего выражения следует, что выигрыш в средней наработке до отказа, полученный путем введения резервных элементов, снижается по мере увеличения кратности резервирования. Так, введение первого элемента приводит к увеличению средней наработки на 50%, второго – на 22%, третьего – на 13%.

7.2 Резервирование с дробной кратностью

Резервирование с дробной кратностью - при этом виде резервирования система может функционировать, если из n однотипных работающих параллельно элементов в работоспособном состоянии находятся r элементов.

Система отказывает, если число отказавших элементов z составляет $z \geq m = n - r+1$. Используя метод перебора состояний, определим вероятность отказа такой системы

$$Q = P\{z = m\} + P\{z = m+1\} + \ldots + P\{z = n\}. \qquad (7.2)$$

В каждом из состояний число работоспособных элементов составляет n-z, а вероятность этого состояния:

$$Q = \sum_{z=m}^{n} C_n^z \, q^z (1-q)^{n-z},$$

где $C_n^z = n!/[z!(n-z)!]$ число сочетаний из элементов по, причем 0! =1; C=C =1.

Резервирование с голосованием по большинству является разновидностью постоянного резервирования с дробной кратностью (мажоритарное).

Структурная схема системы, использующей этот способ резервирования, представлена на рисунке 6.3. Параллельно работает нечетное число элементов, их выходные сигналы $x_1 \cdot x_2, \ldots \ldots x_n$ поступают на вход элемента голосования $Г$ (кворум - элемент), выходной сигнал которого совпадает с сигналом большинства элементов.

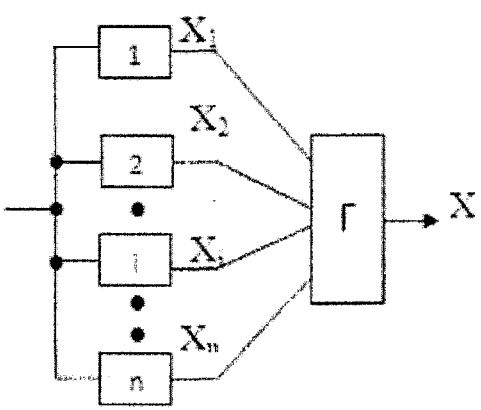


Рисунок 7.1 – Схема соединения элементов с голосованием по большинству

В системах с таким способом резервирования обычно используется три элемента, реже пять. Для работоспособного состояния системы необходима правильная работа большинства элементов. Отказ системы наступает при числе отказов $z \geq m = (n+1)/2$.

Мажоритарное резервирование широко применяют в системах защиты реакторов и теплотехнического оборудования.

7.3 Резервирование двухполюсных элементов

В большинстве случаев резервные элементы подключаются параллельно основному. Однако при дифференциации отказов резервирование по каждому из них может осуществляться при различных способах включения резервных. Каждый вид отказа должен представлять для разных состояний системы различную схему резервирования.

Например, рассмотрим резервирование двухполюсных элементов. У таких элементов возможны два вида отказов: обрыв и короткое замыкание (КЗ). Обрыв ведет несрабатыванию релейного элемента при наличии управляющего сигнала. Короткое замыкание ведет к ложному срабатыванию релейного элемента.

При последовательном соединении релейных элементов (рисунок 7.2,а) несрабатывание любого из элементов приводит к отсутствию цепи между точками *a* и *b*. Таким образом, для этого вида отказов последовательное соединение релейных элементов является основным. Для отказов типа ложное срабатывание последовательное соединение является резервным, поскольку этот вид отказа цепи будет иметь место только при отказе двух элементов.

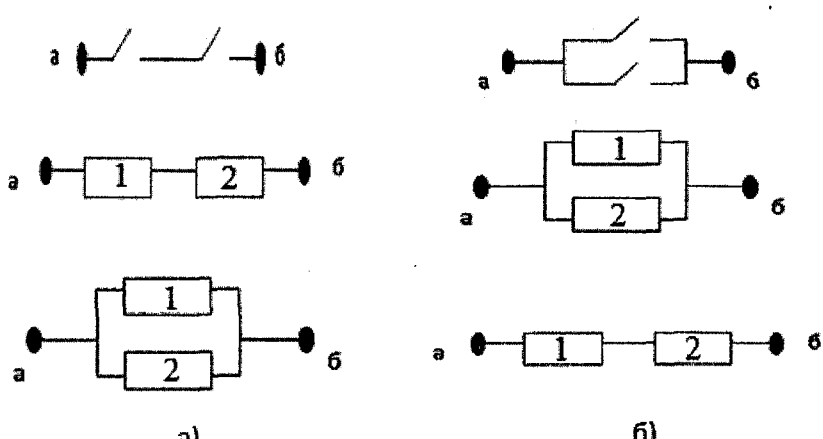


Рисунок 7.2 – Резервирование двухполюсных элементов

При последовательном соединении релейных элементов осуществляется резервирование по отказу типа КЗ. Если вероятность отказов этого типа для каждого элемента q,то:

$$B_{кз} = q/q^2 = 1/q;$$
$$B_{обр} = q/[1-(1-q)^2] = 1/(2-q) < 1.$$

Таким образом, последовательное включение релейных элементов приводит к повышению вероятности возникновения отказов типа *обрыв* цепи.

При параллельном соединении релейных элементов (рисунок 7.2,б) осуществляется резервирование по отказам типа обрыв с эффективностью, а по отказам типа КЗ надежность снижается:

$$B_{обр} = q/q^2 = 1/q;$$
$$B_{кз} = q/[1-(1-q)^2] = 1/(2-q) < 1.$$

7.4 Поэлементное резервирование

Надежность системы, содержащей группы элементов или отдельные элементы с поэлементным резервированием (рисунок 7.3,б), рассчитываются с использованием формул общего постоянного резервирования (5.1) и (5.2). Так, если система состоит из n участков с поэлементным резервированием целой кратностью k_i, то вероятность безотказной работы системы:

$$P = \prod_{i=1}^{n} P_i = \prod_{i=1}^{n}(1 - \prod_{j=0}^{k_i} q_{ij}), \qquad (7.3)$$

где q_{ij} – вероятность отказа j–го элемента, входящего в i–й участок резервирования.

Для сопоставления эффективности общего и поэлементного резервирования сравним вероятности отказа двух систем, включающих одинаковое n(k+1) число равнонадежных элементов. Вероятность отказа системы с общим резервированием:

$$Q_{op} = [1-(1-q)^n]^{k+1}.$$

Считая, что вероятность отказа каждого из элементов q<<1 $(1-q)^n \approx 1-nq$, $Q_{op} = n^{k+1}q^{k+1}$. Для раздельного резервирования, используя (7.3) и считая q<<1, получаем: $Q_{пр} = 1-(1-q^{k+1})^n \approx nq^{k+1}$.

Эффективность поэлементного резервирования по сравнению с общим $Q_{op}/Q_{пр}$ составит n^k. С увеличением глубины n и кратности k резервирования его эффективность растет. Использование поэлементного резервирования сопряжено с введением дополнительных подключающих элементов, имеющих ограниченную надежность. В связи с этим, имеется оптимальная глубина резервирования $n_{опт}$, при $n > n_{опт}$ эффективность резервирования снижается.

8 Лекция №8. Расчет надежности восстанавливаемых систем в динамике

Содержание лекции: рассматриваются математические модели расчета надежности восстанавливаемых систем.

Цель лекции: обучение основным методам расчета надежности восстанавливаемых систем в процессе эксплуатации.

8.1 Восстанавливаемые системы. Интегродифференциальные уравнения надежности

Функционирование восстанавливаемой системы может быть представлены в виде диаграммы (рисунок 8.1).

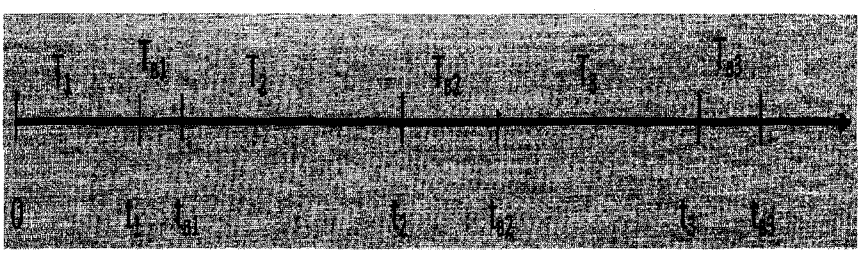


Рисунок 8.1 – Диаграмма функционирования восстанавливаемой системы

В случайные моменты времени t_1 система отказывает, затем в течение $T_{в1}$ восстанавливается и включается в работу в момент $t_{в1}$ и т.д. Две случайные величины, определяющие для расчета надежности восстанавливаемых систем: наработки T_1, T_2,...T_i и длительности восстановления $T_{в1}$, $T_{в2}$,...$T_{вi}$ имеют соответственно функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$ ... $F_i(t)$ и $F_{в1}(t)$, $F_{в2}(t)$,... $F_{вi}(t)$.

Допущение: функции распределения $F(t)$ и $F_в(t)$ считаются не зависящими от числа предшествующих отказов и восстановлений (*альтернирующее* восстановление).

Если в результате восстановления свойства системы сохраняются на первоначальном уровне, то процесс называется *регенерирующим.* Потоки отказов и восстановлений, образованные соответственно моментами возникновения отказов $t_1=T_1$; $t_2=T_1+T_{в1}+ T_2+...$; $t_i=T_1+T_{в1}+ T_2+... + T_i$ и завершения восстановлений $t_{в0}=0$; $t_{в1}=T_1+T_{в1}$; $t_{вi}=T_1+T_{в1}+ T_2+... + T_{вi}$. Каждый из этих процессов характеризуется функциями распределения $\Phi_i(t)$ и $\Phi_{вi}(t)$,

определяемыми F(t) и $F_в(t)$. Функция готовности восстанавливаемой системы $K_г(t)$, характеризующая вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент времени t, представляют собой сумму вероятностей пребывания системы в работоспособном состоянии как при отсутствии отказа на рассматриваемом интервале времени $P_0(t)$, так и после устранения к моменту t одного или более отказов $P_1(t)$, $P_2(t)$,... $P_i(t)$. Поскольку рассматриваемые события являются несовместимыми, то:

$$K_Г(t) = P_0(t) + P_1(t) + \cdots = P_0(t) + \sum_{i=1}^{\infty} P_i(t), \qquad (8.1)$$

где $P_i(t)$- вероятность завершения i –го восстановлении (i+1) –го отказа, то есть $P_i(t) = P\{ t_{вi} < t < t_{i+1}\}$.

Таким образом, каждая из вероятностей, кроме $P_0(t)=1 - F(t)$, представляет собой вероятность двух событий: завершение i –го восстановления в момент θ и последующей безотказной работы на интервале t-θ, откуда:

$$Pi(t) = \int_0^t \Phi'_{вi}(\theta)[1 - F(t-\theta)]d\theta, \qquad (8.2)$$

где $\Phi'_{вi}(\theta)$ - производная функции распределения завершения i–го восстановления, то есть $\Phi'_{вi}(\theta) = P\{t_i + T_{вi} < \theta\}$.

С учетом значения $P_0(t)$, подставляя (8.2) в (8.1), получаем:

$$K_Г(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t-\theta)] \sum_{i=1}^{\infty} \Phi'_{вi}(\theta) d\theta = P(t) +$$
$$\int_0^t P(t-\theta) h(\theta) d\theta, \text{ где } h(\theta) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi'_{вi}(\theta). \qquad (8.3)$$

Функция распределения времени завершения i–го восстановления $\Phi_{вi}(t)$ определяется функциями F(t) и $F_в(t)$. Так, вероятность завершения первого восстановления $\Phi_{в1}(t)$ к моменту времени t определяется совместным событием возникновения первого отказа в момент времени θ и завершения восстановления за последующий интервал времени $(t - \theta)$, то есть:

$$\Phi_{в1}(t) = \int_0^t F'(\theta) F(t-\theta) d\theta ;$$
$$\Phi_{в2}(t) = \int_0^t \Phi'_2(\theta) F_в(t-\theta) d\theta,$$
$$\text{где } \Phi'_2(\theta) = \int_0^t \Phi'_{в1}(\theta) F(t-\theta) d\theta$$

и т.д.

С использованием функции $\Phi_i(t)$определяется такая характеристика потока отказов v(t), как ведущая функция:

$$W(t) = M[v(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} iL(t) ;$$

$$L_i(t) = P\{t_i < t < t_{i+1}\} = \Phi_i(t) - \Phi_{i+1}(t);$$

$$W(t) = \sum_{i=1}^{\infty} i[\Phi_i(t) - \Phi_{i+1}(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(t)$$

На интервале времени число завершенных циклов восстановления:

$$W = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{Bi}(t) \quad ;$$

$$\lim \int P\{t-\theta\}h(\theta)d\theta = \left(\frac{1}{\tau'}\right)\int_0^{\infty} P(t)dt \quad ,$$

где $\tau' = M[T+T_B] = \tau+\tau_B$, с учетом 8.1

$$k_Г = \lim K_Г(t) = \tau/(\tau+\tau_B).$$

Для стационарного процесса восстановления, используя предельную теорему Блекуэлла, получаем на интервале времени Δt

$$\lim[W(t+\Delta t) - W(t)] = \Delta t/(M[T]+M[T_B]) = \Delta t/(\tau+\tau_B). \qquad (8.4)$$

Откуда $w = 1/(\tau+\tau_B) = k_Г/\tau$.

8.2 Метод переходных вероятностей

При произвольных функциях распределения времени безотказной работы и восстановления надежность систем анализируется путем дискретизации времени с заданием на каждом его интервале вероятностей перехода системы из одного состояния в другое. При постоянстве направлений переходов системы из одного состояния в другое и допущении об ординарности, независимости и стационарности потока отказов система может быть отнесена к марковским системам с дискретным временем. Отличительным свойством таких систем является то, что вероятность перехода системы в любое из возможных состояний, число которых ограничено, зависит только от текущего и не зависит от предшествующих.

Надежность таких систем описывается системой алгебраических уравнений, число которых соответствует числу возможных состояний системы. Для их составления используется ориентированный граф состояния. Вершины графа соответствуют возможным состояниям системы, а ребра характеризуют направление и вероятность перехода из одного состояния в другое.

В качестве примера проанализируем надежность системы защиты, которая может находиться в трех состояниях: работоспособном 1, ложного

срабатывания 2 и несрабатывания 3 (рисунок 8.2). За интервал времени Δt с вероятностью p_{11} система сохраняет работоспособное состояние либо с вероятностью p_{12} и p_{13} переходит в неработоспособное состояние 2 или 3. За этот же период времени система с вероятностью p_{21} и p_{31} восстанавливается и возвращается в работоспособное состояние. При восстановлении всех отказавших систем $p_{22}=p_{33}=0$, а $p_{21}=p_{31}=1$.

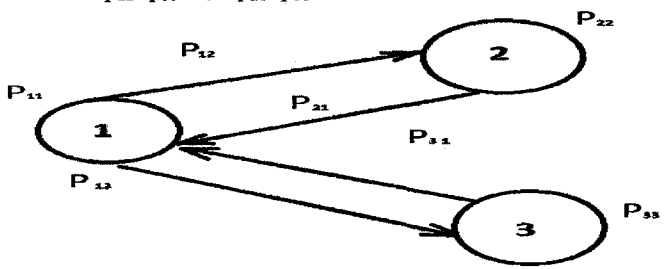


Рисунок 8.2 – Граф состояния системы защиты

Вероятность нахождения системы в любом из состояний после i интервалов времени определяется следующей системой алгебраических уравнений:

$$P_1(i) = p_{11}\times P_1(i-1)+p_{12}\times P_2(i-1)+p_{31}\times P_3(i-1);$$
$$P_2(i) = p_{12}\times P_1(i-1)+p_{22}\times P_2(i-1);$$
$$P_3(i) = p_{13}\times P_1(i-1)+p_{33}\times P_3(i-1). \qquad (8.5)$$

После любого числа интервалов:

$$P_1(i) + P_2(i) + P_3(i) = 1.$$

Для решения системы уравнений (4.9) необходимо задать начальные условия. При работоспособном состоянии системы в начальный момент времени: $P_1(0) = 1; P_2(0) = P_3(0) = 0.$

Вероятность нахождения системы после i-интервалов в состоянии j рассчитывается по формуле:

$$P_j(i) = M(0)\times M^i \times D_j. \qquad (8.6)$$

Где $M(0)=\| P_1(0) \quad P_2(0) \quad P_3(0)\|$ - вектор-строка начального состояния системы; M – матрица переходов; D_j – вектор-столбец анализируемого состояния.

$$D_j = 1: \quad M = \begin{matrix} 0 & 1(i-1) & {}^{1i}p_{11} & {}^{1i}p_{11} & {}^{2i}p_{12} & {}^{3i}p_{13} \\ 2(i-1) & p_{21} & p_{21} & p_{22} & 0 \\ 0 & 3(i-1) & p_{31} & p_{31} & 0 & p_{33} \end{matrix}. \qquad (8.7)$$

Матрица переходов составляется непосредственно по графу состояний для рассматриваемого примера. Матрица переходов является квадратной, число строк и столбцов соответствует числу состояний системы. Для записи матрицы удобно воспользоваться следующим приемом. Если вне матрицы

обозначить через 1*i*,2*i*,3*i* состояния системы после i интервалов, 1(*i*-1),2(*i*-1),3(*i*-1) ее предшествующие состояния, то в матрицу записываются вероятности перехода из соответствующего предшествующего в то или иное текущее. Так, если предшествующее состояние 2(*i*-1), а текущее 1*i*, то в пересечении соответствующей строки и столбца записывается p_{21}.

Таким образом, строки матрицы переходов определяют вероятности сохранения того или иного состояния и выхода из него в другие состояния системы, сумма этих вероятностей равна единице. .

Столбцы матрицы представляют собой коэффициенты уравнений (8.5) при $P_j(i\text{-}1)$. Эти коэффициенты определяют вероятности прихода системы в анализируемое состояние из всех возможных, включая анализируемое. При перемножение матриц их перестановка в (8.6) не допускается. При высоком порядке матрицы переходов для расчета этого выражения используется z – преобразование.

8.3 Метод переходных интенсивностей

Экспоненциальное распределение с удовлетворительной точностью описывает функционирование систем и их элементов на участке нормальной эксплуатации. Экспоненциальное распределение описывает процессы в системах без предыстории, поскольку изменение вероятности их нахождения в том или ином состоянии за интервал зависит только от длительности временного интервала. Так, снижение вероятности работоспособного состояния $d\ P_o\ (t) = -\lambda \times e^{-\lambda t}\ dt = \lambda \times P_o\ (t)\ dt$, а вероятности состояния восстановления $dP_1\ (t) = -\mu \times e^{-\mu t} \times dt = \mu \times P_1\ (t)\ dt$. Если система может находиться только в двух состояниях – восстановление и работы, то снижение вероятности одного состояния приводит к соответствующему увеличению вероятности другого состояния, поскольку для любого момента времени $dP_1\ (t) + dP_o\ (t) = 1$. Таким образом, вероятности нахождения систем в момент t+dt в каждом из состояний связаны с соответствующими вероятностями:

$$P_0(t+\Delta t)=P_0(t)-\lambda P_0\ (t)\,d\,t+\mu P_1\ (t)\ dt;$$

$$P_1(t+\Delta t)=P_1(t)-\mu\ P_1\ (t)\,d\,t+\lambda\ P_0\ (t)\ dt. \qquad (8.8)$$

Сопоставляя (8.5) и (8.8), определим, что $(1-\lambda \times dt)=p_{11}$; $\lambda \times dt=p_{12}$; $(1-\mu \times dt)=p_{22}$; $\mu \times dt=p_{21}$; Теперь можно составить матрицу переходов (8.7).

Так как $[P_i\ (t+dt)-\ P_i\ (t)]\ /dt = dP_i\ (t)\ /dt$, то вероятность нахождения системы с непрерывным временем в каждом из состояний определяется следующей системой дифференциальных уравнений первого порядка, называемой системой Колмогорова-Чепмена:

$$P_0(t)/dt=-\lambda P_0\ (t)+\mu P_1\ (t);$$
$$P_1(t)/dt=\lambda P_0\ (t)-\mu P_1\ (t). \qquad (8.9)$$

В общем случае число дифференциальных уравнений определяется числом возможных состояний системы, которое (как и для систем с дискретным временем) должно быть ограничено.

При записи дифференциальных уравнений предварительно составляется перечень возможных состояний системы и соответствующий ему ориентированный граф состояний, подобный представленному на рисунке 8.1. Каждая из вершин соответствует одному из состояний системы, а ориентация ребер определяется направлением перехода. Так, граф состояний рассмотренный выше системы с двумя состояниями обычно изображается в виде, представленном на рисунке 8.3,а.

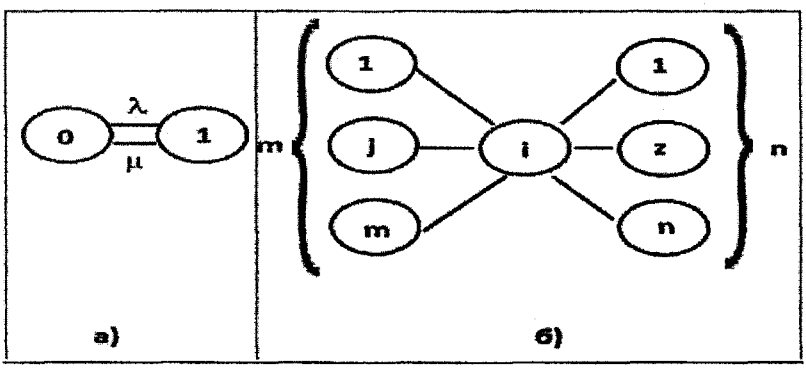


Рисунок 8.3 - Граф состояния восстанавливаемой системы

Для произвольной вершины *i* (рисунок 8.3,б), в которую система может прийти из m вершин и из которой переходит в одну из n вершин:

$$dP_i(t)/dt = \sum_{j=1}^{m} \Lambda_{ji} dP_j(t) - P_i(t) \sum_{z=1}^{n} \Lambda_{iz}. \qquad (8.10)$$

Проверкой правильности составления системы дифференциальных уравнений является равенство нулю суммы правых частей уравнений. При анализе надежности восстанавливаемых систем с непрерывным временем возникают две группы задач. Первая связана с определением функций и коэффициентов готовности и простоя, параметра потока отказов, вторая – с расчетом вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа. При решении задач первой группы состояния. В которых система восстанавливается после отказа, являются отражающими, то есть после завершения восстановления система возвращается в одно из работоспособных состояний. При решении второй группы задач состояния восстановления системы являются поглощающими и интенсивности выхода из этих состояний исключаются.

Поскольку функция готовности $K_Г(t)$ определяет вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в момент времени t, то:

$$K\text{г}\,(t) = \sum_{j=1}^{k} Pj\,(t) = 1 - \sum_{z=1}^{\varepsilon} P_z\,(t),$$

где j и z – работоспособные и неработоспособные состояния системы.

Функция простоя:

$$K\text{п}\,(t) = 1 - K\text{г}\,(t) = 1 - \sum_{j=1}^{k} P_j\,(t) = \sum_{z=1}^{\varepsilon} P_z\,(t). \qquad (8.11)$$

Для определения коэффициента готовности $k_Г$ может быть применено несколько приемов. Один из них основан на непосредственном расчете предела $K\text{г}\,(t)$ при $t\to\infty$. Второй использует предельную теорему, согласно которой $\lim_{t\to\infty} K_Г\,(t) = \lim_{p\to 0} pK_Г\,(p)$, где p = переменная преобразования Лапласа; $K_Г(p)$ - изображение по Лапласу функции $K\text{г}\,(t)$. Коэффициент готовности можно рассчитать по системе дифференциальных уравнений путем приравнивания нулю $dP_i\,(t)/dt = 0$ и решения системы алгебраических уравнений относительно всех работоспособных состояний системы. Так, для системы (8.9) алгебраические уравнения для расчета $k_Г$ имеют вид:

$$-\lambda \times P_o + \mu \times P_1 = 0;\ P_o + P_1 = 1;\ \textit{откуда}\ k_Г = P_o = \mu/(\mu + \lambda).$$

Очевидно, что аналогом коэффициента готовности непрерывных систем для систем с дискретным временем является предельная вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии, определяемая системой алгебраических уравнений (8.9). Поток отказов и ведущая функция восстанавливаемой системы:

$$\omega(t) = \sum_{j=1}^{k} \sum_{z=1}^{\varepsilon} \Lambda jz * Pj(t); \quad W(t) = \int_0^t \omega(t)dt. \qquad (8.12)$$

Средняя наработка между отказами на интервале t:

$$\tau_{ср}(t) = \int_0^t K_Г\,(t)dt - \int_0^t \omega(t)dt.$$

При стационарном процессе восстановления, когда $t\to\infty$ $\omega(t) = \sum_{j=1}^{k} \sum_{z=1}^{\varepsilon} \Lambda jz \times Pj$; *где* $P_j = lim\ P_j(t)$ - финальная вероятность j-го работоспособного состояния. Средняя наработка на отказ $\tau = k_г/\omega$.

Для рассматриваемой выше системы с двумя состояниями:

$$\omega(t) = \lambda \times P_o(t) = \lambda \times K_г(t),$$

$$t \to \infty\ \omega = \lambda \times P_o = \lambda \times K_r; \quad \tau_{ср} = 1/\lambda. \qquad (8.13)$$

При решении второй группы задач в системе дифференциальных уравнений исключаются члены, содержащие в качестве сомножителей интенсивности выхода из поглощающего состояния. В этом случае вероятность безотказной работы $P(t) = \Sigma Pj\,(t)\ (j = 1..k)$, где k - все работоспособные состояния системы. Среднее время безотказной работы рассчитывается как $\tau_{ср}(t) = \int P_0\,(t)\,dt$.

Используем рассмотренный метод анализа для оценки показателей надежности более сложных восстанавливаемых систем, в частности, включающих n последовательно соединенных нерезервированных элементов, каждый из которых характеризуется интенсивностями отказов λ_i и μ_i восстановления. Рассмотрим простой вариант задачи, при котором после отказа любого из элементов система отключается. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 5.1, а граф состояния на рисунке 8.4.

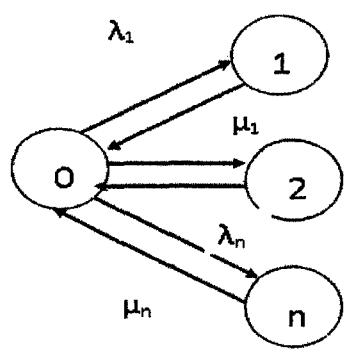


Рисунок 8.4 – Граф состояния системы n последовательно соединенных элементов

Во всех состояниях, кроме нулевого, система отключена и производится восстановление соответствующего элемента. Надежность системы в любой момент времени характеризуется следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \cdots + \lambda_n) \times P_0(t) + \mu_1 \times P_1(t) + \cdots + \mu_n \times P_n(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_1 \times P_0(t) - \mu_1 \times P_1(t) \\ \frac{dP_n(t)}{dt} &= \lambda_n \times P_0(t) - \mu_n \times P_n(t) \\ P_0(t) + P_1(t) + \cdots + P_n(t) & \end{aligned}\right\}. \qquad (8.14)$$

Функция готовности с преобразованием Лапласа:

$$K_г(p) = P_0(p) = 1/p\left[1 + \frac{\lambda_1}{p+\mu_1} + \cdots + \frac{\lambda_n}{p+\mu_n}\right].$$

9 Лекция № 9. Планы испытаний

Содержание лекции: рассматриваются основные планы испытаний надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем.

Цель лекции: обучение основных практических методов оценки надежности по результатам испытаний.

9.1 Виды испытания на надежность

В зависимости от цели проведения испытания на надежность делят на *определительные* (исследовательские) *и контрольные.*

Цель *определительных испытаний* – нахождение фактических значений показателей надежности и при необходимости параметров законов распределения таких случайных величин, как время безотказной работы, наработка между отказами, время восстановления, частота отказов и др.

Цель *контрольных испытаний* – проверка соответствия фактических значений показателей надежности требованиям стандартов (СТРК), технических заданий (ТЗ) и технических условий (ТУ), т.е. принятие решения типа «да - нет» о соответствии или несоответствии надежности системы предъявленным требованиям.

Кроме оценки показателей надежности, целями испытаний обычно являются: изучение причин и закономерностей возникновения отказов; выявление конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на надежность; выявление наименее надежных элементов, узлов, блоков, технических средств; разработка мероприятий и рекомендаций по повышению надежности; уточнение продолжительности и объема технического обслуживания, количества запасных частей и другое.

Испытания надежности можно проводить в лабораторных (стендовых) и эксплуатационных условиях. Испытаниям надежности в лабораторных условиях обычно подвергаются технические средства и некоторые локальные системы.

Эти испытания обычно выполняются на заводах – изготовителях или в организациях – разработчиках технических средств, они могут быть как определительными, так и контрольными.

При лабораторных испытаниях можно имитировать воздействия внешней среды на систему, в первую очередь условия эксплуатации.

Для этого служат специальные установки: термокамеры для изменения температуры, барокамеры для изменения давления, вибростенды для создания вибраций и т.д.

Лабораторные испытания могут проходить при тех же воздействиях (температуре, влажности, вибрации и т.д.) и режимах работы, которые имеют место при эксплуатации.

Испытания надежности в условиях эксплуатации заключаются в сборке и обработке информации о поведении автоматизированных систем и их элементов и о воздействии внешней среды при опытной и (или) промышленной эксплуатации совместно с действующим технологическим объектом управления. Эти испытания обычно являются определительными.

Оба вида испытаний – эксплуатационные и лабораторные – дополняют друг друга.

Преимуществами эксплуатационных испытаний являются: естественный учет влияния воздействий внешней среды, например температуры, вибрации, квалификации оперативного и ремонтного персонала; низкая стоимость испытаний, так как их проведение не требует дополнительных затрат на оборудование, имитирующее условия эксплуатации (полигоны при заводах – изготовителях), что позволяет в сравнительно короткие сроки получить статистически достоверную информацию.

Недостатками эксплуатационных испытаний по сравнению с лабораторными являются: невозможность проводить активный эксперимент, изменяя по желанию экспериментатора параметры внешней среды для систем; ниже достоверность информации; меньше оперативность информации, так как начало ее получения может иметь место после изготовления всех технических средств, монтажа и наладки систем.

Исходной информацией для статистического исследования, на основании которого должны быть сделаны выводы о показателях надежности, служат результаты наблюдений.

Эти результаты могут быть разными для одних и тех же систем в зависимости от того, каким образом они были получены.

Перед началом испытаний необходимо выработать правило, согласно которому следует проводить испытания. Выработку такого правила будет называться планированием испытаний. Выбор плана диктуется целями поставленных испытаний.

Кроме расчетных и экспериментальных методов оценки показателей надежности имеет место и расчетно–экспериментальные методы. Такие методы применяют, если по техническим, экономическим и организационным причинам невозможно или нецелесообразно применять экспериментальные методы, например для систем, которые нельзя испытать в полном объеме.

9.2 Определительные испытания

Определительным испытаниям могут подвергаться автоматизированные системы управления в целом, их подсистемы, функции, технические средства и любые другие элементы систем.

Перед началом определительных испытаний составляется *план испытаний.* Планом испытаний называют правила, устанавливающие объем выборки, порядок их проведения испытаний и критерии их прекращения. Рассмотрим наиболее распространенные планы определительных испытаний. Наименование плана принято обозначать тремя буквами (цифрами): первая из них обозначает число испытуемых систем, вторая – наличие R или отсутствие U восстановлений на время испытаний в случае отказа, третья – критерий прекращения испытаний.

План [NUŤ] соответствует одновременному испытанию систем. Эти системы после отказа не восстанавливаются (или же восстанавливаются, но данные о их поведении после первого отказа в испытаниях не рассматриваются). Испытания прекращают по истечении наработки каждой отказавшей системы. На рисунке 9.1, а знаком «х» обозначено наличие отказа; t_i - наработка до отказа i–ой системы. Этот план обычно применяют для определения вероятности безотказной работы системы за время Ť.

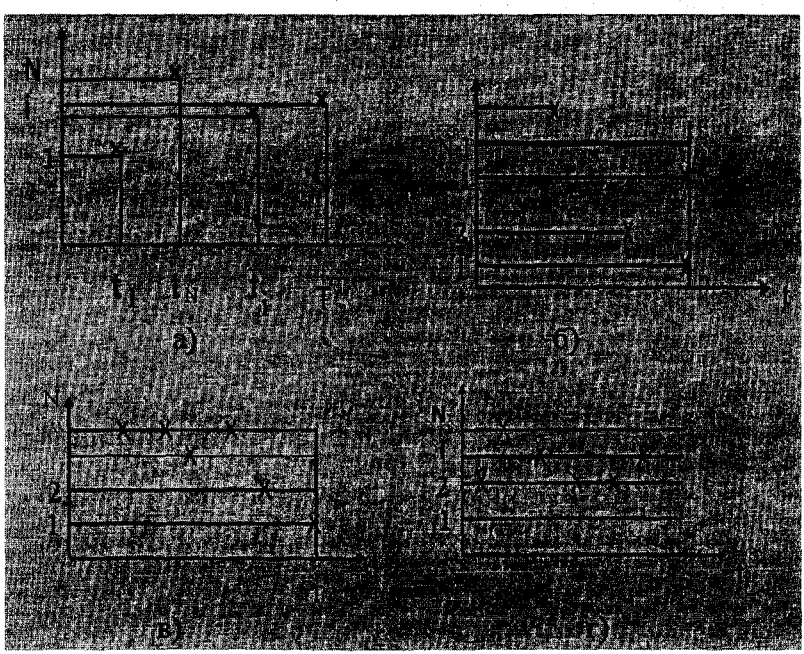


Рисунок 9.1 – Планы испытаний

Испытания прекращают по истечении наработки каждой отказавшей системы. Этот план обычно применяют для определения вероятности безотказной работы системы за указанное время $\check{T}$.

План [NUr] соответствует испытаниям N таких же невосстанавливаемых систем, однако в отличие от плана [NUT] испытание прекращают, когда число отказавших систем достигает r. На рисунке 9.1,б, r - ый отказ имеет место у i–ой системы. Если r = N , переходим к плану *[NUN],* когда испытания прекращаются после отказов всех систем.

План [NUr] обычно применяют для определения средней наработки до отказа в случае экспоненциального распределения, а план [NUN] – в случае нормального распределения. Испытания по плану [NUN] требуют значительных времени и числа испытываемых систем, но дают возможность полностью определить эмпирическую функцию распределения. Планы [NUr], [NU$\check{T}$] позволяют определить эмпирическую функцию распределения только для некоторого интервала времени, дают меньше информации, зато позволяют быстрее закончить испытания.

План *[NR$\check{T}$]* описывает испытания N систем, причем отказавшие во время испытаний системы заменяют новым или восстанавливают. Испытания прекращают по истечении наработки $\check{T}$ каждой из позиций (под позицией понимаем определенное место на стенде или объекте, применительно к которому наработка исчисляется независимо от произошедших на данной позиции замен или восстановлений (рисунок 9.1, в).

План [NRr] соответствует испытанияv N систем, когда отказавшие во время испытаний системы заменяют новыми или восстанавливают. Испытание прекращают, когда суммарное по всем позициям число отказавших систем достигает r (рисунок 9.1,г).

Задачами планирования является определение минимального объема наблюдений – выбор числа испытываемых систем N, а также продолжительности наблюдений $\check{T}$ для планов [NU$\check{T}$] и [NR$\check{T}$] или числа отказов r для планов [NUr] и [NRr].

Результатами определительных испытаний должны являться точечные и интервальные оценки показателей надежности.

Точечная оценка понятие математической статистики. Пусть имеются результаты k наблюдений $t_1, t_2,\ldots t_k$ над некоторой случайной величиной T с функцией распределения F(t,υ), причем праметр υ этого распределения неизвестен. Необходимо найти такую функцию $\tilde{\upsilon}=g(t_1,t_2,\ldots t_k)$ результатов наблюдений $t_1,\ldots t_k$, которую можно было рассматривать как оценку параметра υ. При таком выборе финкций g каждой совокупности $(t_1,\ldots t_k)$ будет соответствовать точка $\tilde{\upsilon}$ на числововй оси, которую называют *точечной оценкой параметра υ.*

Статистические определения показателей надежности, приведенные в лекции 2, являются их точечными оценками. При этом оценка средней наработки до отказа соответствует плану [NUN], так как здесь

рассматриваются завершенные (не прерванные в испытаниях) наработки до отказа каждой из испытуемых систем.

$$\tilde{\tau}=\sum_{i=1}^{N} t_i/N \quad . \tag{9.1}$$

Это соотношение имеет место при любых законах распределения наработки до отказа.

Для экспоненциального распределения, кроме плана [NUN] , точечная оценка средней наработки до отказа.

$$\tilde{\tau}=S/n_\Sigma \quad . \tag{9.2}$$

суммарная наработка всех систем за время испытаний;

n_Σ - суммарное число отказов всех систем на время испытаний.

Например, при плане [NU$\check{T}$].

$$S=\sum_{i=1}^{L} t_i + (N-l)*T \tag{9.3}$$

,

где L - число систем, отказавших на интервале $(0,\check{T})$;

t_i - наработка до отказа i– той системы из числа отказавших (i=1,L).

При плане [NUr]

$$S=\sum_{i=1}^{r} t_i + (N-r)*t_r \quad . \tag{9.4}$$

Для плана [NRT] и простейшего потока :

$$\tilde{\tau}=\tilde{\theta}=S/n_\Sigma =NT/n_\Sigma \quad . \tag{9.5}$$

Оценка интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$ при экспоненциальном распределении согласно (3.6) может быть определена через оценку средней наработки до отказа: $\tilde{\lambda} = 1/\tilde{\tau}$. Например, при плане [NUN] $\tilde{\lambda} = N/\prod_{i=1}^{N} t_i$.

При плане [NRT] оценка параметра потока отказов $\tilde{\omega}$ совпадает с оценкой интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$:

$$\tilde{\omega} = \tilde{\lambda} = n_\Sigma/(N\hat{T}) \, . \tag{9.6}$$

При нормальном распределении и плане [NUN]:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(t_i - \tilde{\tau})^2} \ . \qquad (9.7)$$

Для рассмотрения точности оценки вводится понятие доверительного интервала. *Интервальные оценки* заключается в определение доверительного интервала. Примем, что имеются результаты k наблюдений $t_1, t_2 ..., t_k$ над случайной величиной T с функцией распределения F(t,V) , где параметр V неизвестен. Необходимо найти такую функцию $V_н = g_н(t_1, t_2 ..., t_k)$ результатов наблюдений, чтобы интервал $(V_н, \infty)$ накрывал неизвестный параметр V с заданной вероятностью γ_1:

$$P\{V > V_H\} = \gamma_1 \ . \qquad (9.8)$$

Величину V_H называют нижней доверительной границей параметра V при односторонней доверительной вероятности γ_1.

Для заданной вероятности γ_2 по той же совокупности наблюдений может быть найдена функция $V_{вр} = g_{вр}(t_1, t_2 ..., t_k)$ такая, что интервал $(0, V_{вр})$ накрывает параметр V с вероятностью γ_2:

$$P\{V < V_{ВР}\} = \gamma_2 \ . \qquad (9.9)$$

Величину $V_{ВР}$ называют верхней доверительной границей параметра V при односторонней доверительной вероятности γ_2.

Нижняя и верхняя доверительные границы образуют доверительный интервал, который с вероятностью γ накрывает на числовой оси неизвестное значение параметра V. При $\gamma_1 > 0{,}5$ и $\gamma_2 > 0{,}5$ (доверительные вероятности γ_1 и γ_2 обычно выбираются не менее 0,8) согласно (9.8) и (9.9):

$$P\{ V_H < V < V_{ВР} \} = 1 - P\{V < V_H\} - P\{V > V_{ВР}\} = 1 - (1 - \gamma_1) - (1 - \gamma_2) = \gamma \ .$$

где $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1$.

Обычно принимают, что $\gamma_1 = \gamma_2$, тогда $\gamma = 2\gamma_1 - 1$.

Значение доверительного интервала тем меньше, чем больше число наблюдений (например, чем больше число отказов при испытаниях) и чем меньше значение γ доверительной вероятности.

Определение границ доверительного интервала заключается в следующем. Так как оценка $\tilde{V}$ неизвестного параметра V является случайной величиной, то находим закон ее распределения. Затем определяем интервал $(V_H, V_{ВР})$, в которой случайная величина $\tilde{V}$ попадает с вероятностью γ.

9.3 Контрольные испытания

Контрольным испытаниям обычно подвергаются подсистемы, технические средства и их элементы. Для технических средств обязательными являются контрольные испытания на безотказность.

Испытания на ремонтопригодность, сохраняемость и долговечность проводят в тех случаях, когда это предусмотрено стандартами, техническими заданиями или техническими условиями на конкретный прибор (средства).

Периодичность контрольных испытаний на безотказность обычно не реже одного раза в три года.

Для проведения контрольных испытаний из совокупности (партия) однородных приборов составляется некоторая выборка и проводятся испытания на надежность попавших в эту партию приборов.

По результатам испытания выборки выносится суждение о соответствии всей партии предъявленным требованиям.

Математический аппарат решения задачи – изучаемые в математической статистике методы проверки статистических гипотез.

В качестве проверяемой (или, как принято говорить, нулевой) гипотезы принимается предположение, что партия соответствует требованиям к надежности, в качестве противоположной (альтернативной) или что партия не удовлетворяет этим требованиям.

По результатам испытаний имеет место одна из следующих четырех ситуаций:

1) Партия удовлетворяет требованиям; по результатам испытаний подтвердилась нулевая гипотеза, и принято решение о принятии партии. Это решение правильно.

2) Партия удовлетворяет требованиям, но по результатам испытаний нулевая гипотеза не подтвердилась. Это произошло потому, что случайно составленная выборка содержала повышенное число отказавших приборов по сравнению с совокупностью. Принята альтернативная гипотеза; это решение неправильно и невыгодно для изготовителя приборов. При этом произошла ошибка, вероятность которой называют *риском поставщика (изготовителя)* α.

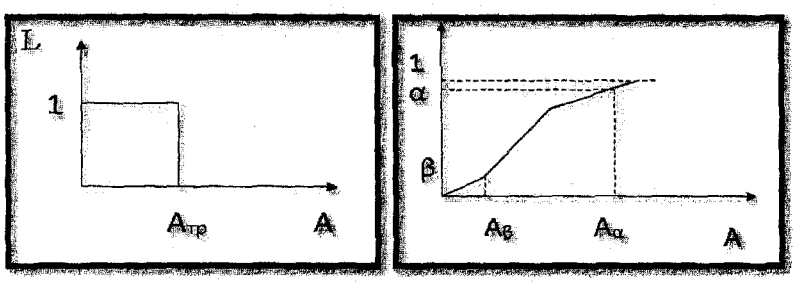
3) Партия не удовлетворяет требованиям, по результатам испытаний нулевая гипотеза не подтвердилась. Принята альтернативная гипотеза, т.е. решение о неприятии партии. Это решение правильно.

4) Партия не удовлетворяет требованиям, но по результатам испытаний подтвердилась нулевая гипотеза о соответствии требованиям надежности, так как выборка содержала повышенное число неотказавших приборов по сравнению со всей партией. Принято решение, но оно не выгодно в отличие от п. 2 не изготовителю, а потребителю – заказчику этих приборов. Произошла ошибка, вероятность которой называют *риском потребителя (заказчика)* β.

Естественно, что желательно снизить значения обеих ошибок, доведя их до нуля. Зависимость вероятности L приемки партии от показателя

надежности А (называемой оперативной характеристикой плана контроля) для такой предельной ситуации дана на рисунке 9.2,а. Пусть $A_{тр}$ – требуемое значение показателя надежности. В этой ситуации нулевая гипотеза $A \geq A_{тр}$. Если она справедлива, то партия принимается с вероятностью, равной единице, причем $\alpha=0$. Альтернативная гипотеза заключается в том, что $A \leq A_{тр}$. При этом партия бракуется с вероятностью, равной единице, причем $\beta=0$. Однако такая идеальная оперативная характеристика недостижима, так как требует бесконечного объема наблюдений.

В реальной ситуации вводятся два уровня контролируемого показателя надежности: приемочный A_α и браковочный A_β (рисунок 9.2,б).



а) б)

Рисунок 9.2 – Идеальная (а) и реальная (б) оперативные характеристики планов контроля

Если $A \geq A_\alpha$, то приборы должны приниматься с достаточно высокой вероятностью, не ниже $L(A_\alpha)$, если $A \leq A_\beta$, то приборы должны браковаться с достаточно высокой вероятностью, не ниже $1 - L(A_\beta)$. При этом риск поставщика $\alpha=1-L(A_\alpha)$, риск потребителя $\beta=1-L(A_\beta)$. Тем самым проверку нулевой гипотезы $A \geq A_{тр}$ при альтернативе $A \leq A_{тр}$ заменяем другой задачей – проверкой нулевой гипотезы $A \geq A_\alpha$ при альтернативе $A \leq A_\beta$. Чем ближе A_α к A_β, тем больший объем испытаний необходим для принятия достоверного решения о соответствии партии.

Значение браковочного уровня A_β устанавливается с учетом приемочного уровня A_α, стоимости, продолжительности и условий испытаний и т.п.

Риск поставщика α и потребителя β обычно принимается равным 0,1-0,2, но в принципе по согласованию между потребителем и поставщиком возможен выбор и иных значений α и β.

Контрольные испытания на безотказность проводятся обычно одно- или двухступенчатым методом. При применении первого из них испытания выполняют следующим образом. Образцы, вошедшие в выборку объема d, испытывают в течение времени $t_и$. По окончании испытаний определяют число наступивших отказов n. Если оно равно или меньше приемочного числа c, определенного в зависимости от величины A_α, A_β, α и β, то нулевая гипотеза

подтверждается и партию принимают. Если же n>c, то подтверждается альтернативная гипотеза и партию не принимают. Одноступенчатый метод при прочих равных условиях обеспечивает минимальную календарную продолжительность испытаний, двухступенчатый при тех же условиях позволяет обеспечить минимум среднего объема испытаний.

10 Лекция №10. Методы повышения показателей надежности

Содержание лекции: рассматриваются теоретические аспекты повышения надежности приборов на примере измерительной системы.

Цель лекции: обучение основным методам повышения надежности на этапе проектирования и эксплуатации.

10.1 Методы повышения показателей надежности на этапе проектирования

В настоящее время широко применяются два пути повышения надежности, связанные с основными этапами жизни любой технической системы.

Первый этап - это этап проектирования и производства, второй - этап эксплуатации.

Повышение надежности на этапе проектирования считается основополагающим: при нем закладываются все возможности по качественному выполнению системой ее основных функций безопасной работы в заданных временных характеристиках.

Второй этап связан с обеспечением потенциально заложенной надежности при проектировании системы.

Однако с помощью определенных мероприятий в процессе эксплуатации можно повысить надежность и даже превзойти ее уровень, заложенный при проектировании и производстве.

Это во многом достигается путем доработки аппаратуры и совершенствованием исходных технологических и организационных мероприятий в процессе эксплуатации при трехсторонней связи между проектировщиками, производством и эксплуатанта.

Основные *методы повышения надежности на этапе проектирования и производства* включают следующее :

1) Применение высоконадежных комплектующих элементов. Для этого проводят либо выборочную, либо полную предварительную проверку и испытание элементов системы в условиях приближенных к ее условиям эксплуатации.

2) Проектирование, возможно, более простой аппаратуры, путем применения известных ранее и хорошо себя зарекомендовавших блоков, узлов и схемных решений.

3) Снижение возможных перегрузок в работе аппаратуры от изменения температуры, вибраций, повышенных питающих напряжений, электромагнитных полей.

4) Автоматизацию проектирования, при которой оптимизируется конструкция объекта с учетом требований стандартов, и исключаются конструкционные ошибки при переносе информации на технологическую и производственную базу.

5) Резервирование особо ответственных узлов, блоков операций в программном обеспечении системы.

10.2 Методы повышения надежности на этапе эксплуатации

Методы повышения надежности на этапе эксплуатации включают следующее:

1) Доработку аппаратуры на основе опыта эксплуатации и связи эксплуатанта с разработчиками и производителем.

2) Снижение нагрузок действующих на аппаратуру, улучшение условий работы и хранения.

3) Совершенствование технологических процессов работы и технического обслуживания систем.

4) Повышение квалификации обслуживающего технического персонала.

5) Выполнение всех необходимых плановых профилактических мероприятий.

6) Внедрение различных современных средств контроля.

7) Прогнозирование надежности и постоянный, всесторонний анализ статистики отказов.

8) Совершенствование методов организации труда эксплуатантов аппаратуры различных технических систем.

В условиях перехода к эксплуатации систем автоматики и телемеханики на основе анализа ее текущего состояния, все большее значение для обеспечения надежности имеет своевременная диагностика отказов с выполнением принципов ее отказобезопасного проектирования.

На этапе проектирования аппаратуры наиболее кардинально вопросы повышения надежности решаются также при резервировании ее основных узлов.

Анализируют надежность на стадии проектирования обычно в несколько этапов.

На первом этапе, проводимом на стадии составления технического задания на локальную систему или отдельное техническое средство, когда их структуры не определены, производится прикидочная оценка надежности.

Она исходит из приоритетной информации о надежности близких по характеру систем и элементов, с помощью которых они могут реализованы.

На втором этапе проводится ориентировочная оценка надежности. При этом известны структура системы и входящие в ее состав элементы, их показатели надежности, заданные при нормальных (номинальных) условиях эксплуатации.

Окончательный расчет надежности технических средств, иногда называют *коэффициентным*, проводится на стадии завершения технического проекта, когда проведена эксплуатация опытных образцов устройства и известны условия эксплуатации всех элементов системы.

При этом определяется уровень нагрузок, характером изменения таких влияющих величин, как температура окружающей и регулируемой среды, уровень вибрации, колебания напряжения питания, частоты, колебания влажности воздействия радиации, электромагнитные излучения и магнитные поля.

Учет этих величин позволяет произвести коррекцию значений интенсивностей отказов элементов и систем.

10.3 Основные этапы расчета надежности устройств и систем управления при различных видах отказов

Информационно-измерительные подсистема (ИИП) является одной из основных в системе управления технологическим объектом любой сложности и глубины средств автоматизации.

Основное назначение ИИП заключается в представлении оператору информации о ходе технологического процесса и его эффективности, о состоянии основного и вспомогательного оборудования.

Поскольку оператор отвечает за качество ведения технологического процесса и при любых отказах системы регулирования осуществляет либо корректировку ее работы, либо переход на ведение процесса управления вручную.

Для наиболее ответственных параметров, определяющих безаварийную работу оборудования, предусматривается резервирование измерительных цепей и приборов, а также использование информационной избыточности. В системах управления современными энергоблоками, объектами металлургической и химической промышленности используются измерительные каналы, представленные на рисунке 10.1.

На местных щитах управления или непосредственно на технологическом объекте устанавливают показывающие и самопищущие измерительные приборы (ИП): манометры и дифманометры с импульсными линиями ИЛ, стеклянные и цифровые, манометрические термометры (рисунок 10.1, а).

Наиболее распространенным элементом ИИП являются измерительные комплексы (локальные измерительные системы), включающие первичные преобразователи ПП с импульсными линиями, электрическими и

пневматическими линиями связи ЛС и вторичные показывающие или самопишущие приборы ВП, (рисунок 10.1, б).

Измерительные комплексы могут включать и большое количество устройств, так комплект расходометра, помимо перечисленных элементов содержит сужающее устройство, а анализаторы состава газов и растворов – совокупность устройств, необходимых для подготовки и транспортировки пробы.

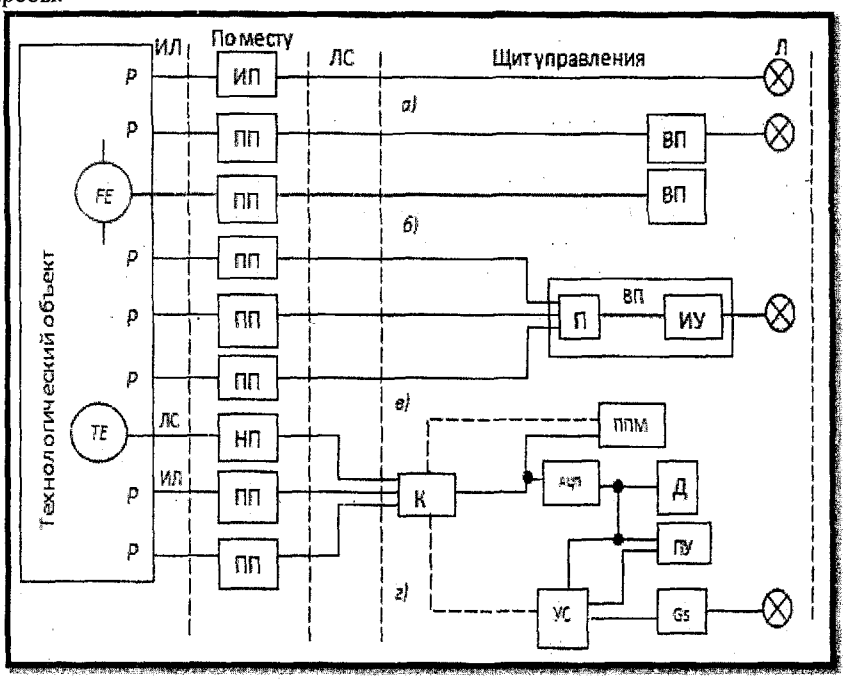


Рисунок 10.1- Принципиальная схема информационной измерительной подсистемы

Для измерения однородных параметров можно использовать многоточечные вторичные приборы, включающие переключатели П и измерительное устройство ИУ, (рисунок 10.1, *в*).

Структурная схема измерительной системы ИС, осуществляющей контроль технологических параметров с возможностью их избирательного вызова на показывающий многошкальный потенциометр ППМ, индикатор Д в сочетании с их периодической регистрацией с помощью цифропечатающего устройства ПУ и сигнализацией отклонений, превышающих допустимые значения, задаваемые устройством сравнения УС представлены на рисунке 10.1, *г*.

Для преобразования аналоговых сигналов в дискретные используются аналоговые преобразователи АЦП, первичные преобразователи подключаются к системе через коммутатор К.

При включении в ИИП вычислительной машины круг функций, выполняемых системой, дополняется расчетом технико-экономических показателей, диагностикой состояния оборудования.

При расчете надежности каналов ИИП используются показатели надежности технических средств, входящих в их состав.

Информационно - измерительная подсистема ИИП выполняет ряд функций: измерение, расчет технико-экономических показателей, регистрацию аварийных ситуаций, причем эти функции являются составными и могут быть как непрерывными, так и дискретными; измерительные каналы выполняют простые функции.

В технические условия на средства измерения (СИ) вводится вероятность безотказной работы за заданное время, задающая вероятность нахождения определяющего параметра в заданных допустимых пределах в течении указанного времени.

Для СИ параметры надежности выбираются из круга нормируемых метрологических характеристик. В большинстве случаев такими параметрами являются основная погрешность показаний, регистрации, выходного сигнала.

Изменение метрологических характеристик СИ может быть связано как с внезапными, так и с постепенными (параметрическими) отказами их элементов.

Изменения в ходе эксплуатации СИ таких влияющих величин, как температура окружающей среды, влажность, напряжение питания, уровень вибрации, солнечная радиация, биологические факторы вызывают дополнительные случайные изменения систематической погрешности, которые могут устраняться при возвращении влияющей величины в зону нормальных значений.

Рассмотрим случай, когда у СИ нормированы вероятности внезапных $q_в$ и метрологических $q_м$ отказов, тогда как у остальных элементов измерительных цепей, таких как импульсные линии, электрические линии связи, - вероятности внезапных отказов $q_в$.

Вероятность безотказной работы СИ, состоящей в отсутствии обоих видов отказов, при их независимости:

$$P = (1 - q_в)(1 - q_м) = 1 - q_в - q_м + q_м \cdot q_м \ . \qquad (10.1)$$

Расчет показателей надежности СИ, измерительных комплектов и каналов может осуществляться как по каждому из видов отказов, так и по обоим применительно к конкретным функциям измерительных систем.

При допущении, что после отказа импульсной линии прибор отключается, вероятность возникновения метрологического отказа в системе, изображенной на рисунке 10.1, а.

$$Q_{м}(t) = p_{ил}(t)\, q_{мип}(t). \quad (10.2)$$

При низкой вероятности одновременного возникновения внезапных отказов в подводящей линии и приборе вероятность этого вида отказов

$$Q_{в}(t) = q_{в\,ил}(t)\, p_{в\,ип}(t) + p_{ил}(t)\, q_{в\,ил}(t), \quad (10.3)$$

где $p_{в\,ип}(t) = 1 - q_{в\,ил}(t)$.

Вероятность безотказной работы измерительного прибора с импульсной линией

$$P(t) = p_{ил}(t) = [1 - q_{в\,ил}(t)][1 - q_{в\,ил}(t) - q_{м\,ип}(t) + q_{в\,ил}(t)\, q_{м\,ип}(t)]. \quad (10.4)$$

Информационно-измерительная система – ИС (рисунок 10.1, г) является многофункциональной. Отказ коммутатора приводит к отказу всей системы, отказ АЦП вызывает отказ значительной части функций: цифровых индикаторов, периодической регистрации, сигнализации и регистрации аварийных отклонений.

11 Лекция №11. Надежность программного обеспечения

Содержание лекции: рассматриваются особенности оценки надежности программного обеспечения.

Цель лекции: обучение основным принципам оценки надежности программного обеспечения приборов и систем.

11.1 Надежность программного обеспечения

Надежность программного обеспечения – это свойство сохранять корректность, устойчивость, безопасность и недоступность в течение определенного периода времени при заданных условиях эксплуатации и технического обслуживания.

Корректность – свойство программы удовлетворять функциональным спецификациям. Корректность требует правильного вычисления выходных данных в области изменения входных данных, удовлетворяющих спецификациям, при условии обеспечения безотказности аппаратных средств.

Устойчивость – свойство программы быть в процессе ее выполнения нечувствительной к ошибкам, отказам аппаратуры и некорректным входным данным. Это свойство аналогично свойству *отказоустойчивости* аппаратуры.

Безопасность - свойство программы вычислять правильные или защитные выходные данные при наличии ошибок или появлении отказов аппаратуры и некорректных входных данных.

Под защитными выходными данными понимаем неправильные результаты при реализации программ, которые не переводят управляющую систему в опасное состояние.

Недоступность – свойство программного обеспечения исключать возможность обращения одного пользователя к данным и программам, которые являются собственностью другого пользователя.

Недоступность достигается тщательной изоляцией данных и программ разных пользователей друг от друга и от операционной системы, а также применением ключевых слов, кодов и других средств защиты информации.

Интенсивность ошибок программного обеспечения лежит в пределах от 0,25 до 10 на 1000 команд. Следовательно, в новой системе, содержащей 500 000 команд, следует ожидать от 125 до 5000 ошибок.

Ошибки программного обеспечения делятся на программные, алгоритмические и системные.

Программные ошибки вызываются неправильной записью команд на языке программирования и ошибками при трансляции. Их количество зависит от квалификации программистов, степени автоматизации программирования, глубины и качества тестирования.

На начальных этапах разработки программные ошибки составляют одну треть всех ошибок, но эти ошибки сравнительно легко обнаруживаются.

Алгоритмические ошибки возникают из-за неправильной постановки задачи или из-за некорректной формулировки алгоритма ее решения, и обнаруживаются они сложнее, чем программные.

Типичными являются такие ошибки: неполный учет условий решения или диапазонов изменения переменных; превышение выделенных ресурсов; неправильная оценка времени реализации отдельных программных модулей и другие.

Труднее всего обнаруживаются *системные* ошибки, которые связаны с неправильным взаимодействием комплексов программ между собой и внешними объектами.

Так, например, в 1968 году космический корабль «Маринер - 1» упал в океан потому, что программист не поставил знак «минус» в утверждении Фортрана. Ошибки в программном обеспечении явились причиной серьезных осложнений в возвращении на землю одного многочисленных советских космических кораблей.

В жизненном цикле программного обеспечения выделяют шесть этапов:

- анализ требований к системе;
- определение спецификаций;
- проектирование;
- программирование;
- тестирование;
- эксплуатация и сопровождение.

Наибольшее число ошибок допускается при проектировании (60%) и программировании (40%). Однако и при тестировании и при сопровождении могут быть внесены новые ошибки.

Например, исправление одной программной, алгоритмической или системной ошибки требует корректировки в среднем соответственно 6, 14 и 25 команд.

С течением времени жизненного цикла программного обеспечения материальные затраты на исправление ошибок возрастают, а вероятность правильного исправления уменьшается.

Работоспособность микропроцессорных и компьютерных систем автоматики в приборостроении возможна только при одновременной работоспособности аппаратуры и программных средств.

По мере развития микропроцессорной техники, расширения ее возможностей благодаря увеличению разрядности, быстродействия объемов памяти постоянно возрастает число функций, выполняемых программными средствами.

Материальные затраты на разработку программного обеспечения могут достигать 90% от общих затрат. Поэтому программное обеспечение превратилось в *самостоятельное промышленное изделие,* оказывающее огромное влияние на трудоемкость, стоимость, работоспособность различных микропроцессорных систем.

Программные отказы существенно отличаются от отказов аппаратных:

- отказ аппаратный зависит либо от времени. либо от объема выполненной работы, а отказ программный – от вероятности выхода программы на ее участок, содержащий ошибку;

- устраненный отказ аппаратуры может повториться при дальнейшей эксплуатации объекта, а устраненный программный отказ в дальнейшем не повторяется;

- прогнозировать возникновение многих аппаратных отказов возможно, а прогнозировать возникновение даже отдельных программных отказов весьма затруднительно или просто невозможно;

- делить программные отказы на внезапные и постепенные по аналогии с аппаратными отказами не имеет смысла.

Испытания программ на надежность и испытание изделий на надежность их программного обеспечения – обязательные этапы при проверке надежности систем.

Испытания на надежность программ проводят с помощью специальных программ (тестирование) и специальных (имитационных) стендов. Затем проверяют надежность изделий при совместной работе программы и изделия.

При этом тестирование требует до 50...60% всех затрат труда на программирование.

В безотказных системах часто применяют двухвариантное программирование с контролем совпадения результатов или разрабатывают для таких систем самопроверяемые программы.

12 Лекция №12. Методы повышения надежности программного обеспечения

Содержание лекции: рассматриваются различные аспекты повышения надежности программного обеспечения.

Цель лекции: обучение основным методам повышения надежности программного обеспечения.

12.1 Повышение надежности программного обеспечения центрального процессора управления

Проблема надежности программного обеспечения приобретает все большее значение в связи с постоянным усложнением разрабатываемых систем, расширением круга задач, возлагаемых на них, а следовательно, и значительным увеличением объемов и сложности программного обеспечения.

Реальная надежность программного обеспечения нередко оказывается ниже, чем надежность самой аппаратуры. Работоспособность микропроцессорных и компьютерных систем возможна только при одновременной работоспособности аппаратуры и программных средств.

Надежность программного обеспечения обуславливается наличием в программах разного рода ошибок, внесенных в нее, как правило, при разработке или в процессе эксплуатации.

Под *ошибкой* понимаем всякое невыполнение программой заданных функций. Проявление ошибки является отказом программы. Программа при фиксации исходных данных должна быть абсолютно надежна, а центральная вычислительная машина (ЦВМ) должна давать однозначный результат на выходе при многократном его повторении.

Однако комбинаторный характер исходных данных, множество условных переходов, зависящих от промежуточных результатов вычислений, создают огромное число возможных путей исполнения программы, которое может быть на несколько порядков больше числа команд в программе.

Проверить все варианты исполнения программы практически невозможно, и практика создания сложных комплектов программного обеспечения показывает, что и после нескольких лет эксплуатации встречаются непроверенные варианты, в которых обнаруживаются ошибки.

Вследствие изложенного факта проявление ошибки в программном обеспечении, является *случайным событием,* хотя сама ошибка не является случайной.

Факторами, определяющими надежность программного обеспечения являются:

- подготовка инженерного персонала по технологии использования цифровой техники;

- контроль выдачи и изменения программ;

-постоянная связь разработчика и заказчика программного обеспечения;

- применение современных методов контроля процесса разработки программ и технической документации;

- внедрение стандартов, регламентирующих работы по программному обеспечению систем.

Важную роль играет постоянный контроль программного обеспечения в виде достаточно формализованных «просмотров» проектной и программной документации специалистом или группой специалистов «тестером».

Повышению качества разработки сложных программ способствуют прогрессивные приемы структурного программирования и принцип модульности программного обеспечения.

В основу структурного программирования должны быть положены следующие правила:

- программа должна составляться мелкими шагами;

- сложная задача должна разбиваться на простые составляющие с одним входом и выходом;

- логика программы должна содержать минимум простых базовых структур.

Принцип модульности заключается в разбиении сложной программы на отдельные подпрограммы – модули, характеризующиеся функциональной законченностью, автономностью и независимостью в разработке и оформлении.

Рекомендуется объем модулей 100 -500 команд. Запрет на применение потенциально ненадежных программных конструкций, возможность оперативного автономного контроля результатов функционирования модуля обеспечивают высокую вероятность исключения ошибок на самых ранних этапах разработки программного обеспечения.

Для создания надежного программного обеспечения используют также принцип структурирования массивов данных, что позволяет снизить вероятность появления ошибок из-за неправильного использования.

Исходя из задач и применяемых методов для выявления ошибок, процесс отладки программного обеспечения можно разделить на следующие этапы:

- структурный контроль соответствия программного обеспечения формализованным требованиям применяют на нижних уровнях иерархической структуры – модулях, подпрограммах, отдельных блоках программы.

Формализованные требования содержат правила структурного, синтаксического и семантического построения программы, выполнение которых обязательно для всех составных частей:

- детерминированное тестирование предусматривает задание конкретных исходных данных и маршрутов исполнения программы;

- проверка всех маршрутов при всех значениях исходных данных может быть реализована только для очень простых программ и при малых диапазонах изменения исходных данных.

Диапазон варьирования исходных данных и степень охвата возможных маршрутов определяют эффективность обнаружения ошибок данным методом.

Восходящее тестирование начинается с автономного тестирования программных модулей самого нижнего уровня, а нисходящее тестирование с автономного тестирования головной программы.

12.2 Модели надежности программного обеспечения

Формулировка требований по надежности к разрабатываемому программного обеспечения (ПО), подтверждение выполнения этих требований на стадии испытаний и эксплуатации, расчет надежности функций вычислительного комплекса (ВК) с учетом надежности ПО, оценка эффективности проведения тех или иных мероприятий по повышению надежности ПО – это далеко не полный перечень задач, для решения которых необходимо использование аналитических или экспериментально-аналитических методов расчета надежности ПО. В настоящее время отсутствуют стандартные методы расчета надежности ПО.

Существует несколько экспериментально-аналитических методов прогнозирования надежности ПО по результатам испытаний, основанных на тех или иных допущениях. К числу более простых относится модель Шумана. Эта модель исходит из следующих предпосылок:

- число команд N в программе постоянно;
- при начальном числе ошибок R_0 в ходе испытаний длительностью T их число снижается, $R(t) < R_0$ новые ошибки в ходе исправлений не вносятся;
- относительное число исправленных в ходе испытаний ошибок $r_и(T) = R_и(T)/N$ и их изменение во времени характеризуют оставшееся число ошибок $r(T) = [R_0 - R_и(t)]/N$ и интенсивность их возникновения:

$$\lambda[T] = k_s\, r[T],$$

где k_s – коэффициент пропорциональности.

В ходе эксплуатации программ:

$$P(t) = e^{-\int_0^t k_s r(t)dt}$$

и будет не ниже $P(t) = e^{-k_s r(T)t}$, поскольку $r(t) < r(0) = r(T)$.

Коэффициент k_s и $r(T)$ рассчитывают по результатам двух интервалов испытаний. В частности, начальная наработка на отказ ПО при испытаниях $T_0 = 1/\lambda(T_0) = N/(k_s R_0)$, откуда $R_0 k_s = N/T_0$. Зная число отказов, предшествующих второй наработке, находим:

$$T_1 = \frac{1}{\lambda(T_1)} = \frac{1}{k_s[\frac{R_0}{N} - r(T_1)]}, \text{ получаем } \quad k_s = \frac{T_1 - T_0}{T_0 T_1 r_н(T_1)}.$$

Для повышения точности определения могут быть использованы статистические данные и метод максимального правдоподобия. Таким образом, с увеличением длительности испытаний растет последующая наработка на отказ ПО. Естественно, что, как и в аппаратных испытаниях, программа испытаний, входные данные должны обеспечивать высокий процент выявления ошибок. Могут быть предложены более сложные модели определения надежности функционирования ПО, использующие те же исходные данные, что и в рассмотренной модели.

При расчете показателей надежности сложных функций управления с учетом надежности ПО возникают трудности, поэтому особенно важны экспериментальные данные, полученные при эксплуатации управляющего вычислительного комплекса.

13 Лекция № 13. Статистические показатели надежности программного обеспечения

Содержание лекции: рассматриваются основные статистические показатели надежности программного обеспечения.

Цель лекции: обучение расчетам основных показателей надежности программного обеспечения.

13.1 Статистические показатели определения надежности программного обеспечения

Наиболее распространенными показателями надежности программного обеспечения являются следующие:

- начальное число ошибок N_0 в программном обеспечении после сборки программы и перед ее отладкой;
- число ошибок n в программном обеспечении, обнаруженных и оставшихся после каждого этапа отладки;
- наработка на отказ T на этапе;
- необходимое время этапа отладки ^ $\tau_{к.о}$ на заданное качество (на число оставшихся ошибок);
- надежность P_o программного обеспечения при отладке на отсутствие единичной ошибки;
- эксплуатационная надежность P или коэффициент готовности $K_г$.

Анализ публикаций по надежности программного обеспечения дает следующие возможные оценки начального числа ошибок:

а) до отладки программного обеспечения на ассемблере (измерительный прибор), с числом передач управления около 20% от объема составляет:

$$N_0 = 0{,}069035\, S_n - 0{,}001251 S_o,$$

где S_n, S_o – количество соответственно передач управления и объем программного обеспечения в словах;

б) до отладки программного обеспечения, начальное число N_0 составляет 2% от объема в словах;

в) до отладки программного обеспечения, начальное число N_0 =1 ошибка на 750 бит текста ассемблера;

д) до отладки программного обеспечения, для объема V в битах

$$N_0 = \frac{V}{3000} \cdot 2loq \frac{V}{1300};$$

е) до комплексной отладки, для специализированных микропроцессоров число N_0 ошибок составит 0,5% от объема программного обеспечения в словах;

д) до комплексной отладки, с точностью 20% для ассемблера с объемом V в словах $N_0 = 5\ V/1024$.

Среднестатистические оценки начального числа N_0 ошибок в программном обеспечении после автономной отладки дают соответственно значения 4,34 для ассемблера и 1,44 для языка программирования высокого уровня на 1К слов кода программы.

По аналогии с аппаратной надежностью возможно применение экспоненциальной модели надежности программного обеспечения в виде:

$P(t) = e^{t/T}$, t – время работы;

$$T = \frac{1}{kN0} e^{k\tau_{ko}}, \qquad (13.1)$$

- экспоненциальная модель среднего времени наработки на отказ; k – коэффициент темпа выработки ошибок, определяемый по формуле:

$$n = N_0[1\text{-}e^{k\tau_{ko}}], \qquad (13.2)$$

где n – число обнаруженных и исправленных ошибок программного обеспечения;

$\tau_{к.о}$ – время комплексной отладки программы.

Начальная наработка программы $T_0 = 1/k\ N_0$, число оставшихся неисправленных ошибок $n_0 = N_0\, e^{k\tau_{ko}}$. Алгоритм определения надежности имеет итерационный характер, так как производится уточнение числа N_0 по числу фактически обнаруженных ошибок $N_0 = n[1\text{-}e^{k\tau_{ko}}]$.

13.2 Статистические определения надежности программного обеспечения

В настоящее время предсказать надежность работы программного обеспечения с учетом требований пользователя весьма сложно. Поэтому представляет интерес к оценке надежности, предложенный Лонгботтом для мини и микровычислительных систем.

По опыту разработки и эксплуатации программного обеспечения им были выделены следующие факторы и поправочные коэффициенты для оценки надежности через число системных отказов λ:

- размер процессора (Б) при числе ИМС более 20 тыс. и быстродействием более 4000 – 1500 команд/с; средний (С) при числе ИМС около 10 тыс. и быстродействие более 250 – 1500 команд/с; (Н) при числе ИМС около 1 тыс. и быстродействие менее 250 команд/с.
- объем программного обеспечения, тысяч команд;
- коэффициент изменения числа отказов λ программного обеспечения по годам работы от начала работы $К_р$;
- коэффициент начального качества $К_к$;
- коэффициент ремонтопригодности и частоты изменений $К_и$;
- коэффициент уровня загруженности и изменений $К_з$.

В таблице 13.1 приведена зависимость начальной надежности программного обеспечения от размера процессора и объема.

Т а б л и ц а 13.1 - Зависимость начальной надежности программного обеспечения от размера процессора и объема

Тип управляющего программного обеспечения	Размер процессора	Объем ПО	$\lambda 10^3$, 1/ч
Мини - и микросистемы			
Элементарная управляющая программа	С	0,25 – 1,0	0,4
Базовая управляющая программа	С	1,0 – 4,0	1,5
Расширенная управляющая программа	С	4,0 – 16	6,0
Базовая операционная система	С	16 – 64	25
Расширенная операционная система	С	64 - 256	100
Типовые системы базовой конфигурации			
Управляющая программа	М	4,0 – 16	6,0
Операционная система с малыми возможностями	М/С	16 – 64	25
Операционная система со средними возможностями	С	64 – 256	100
Универсальная операционная система (полного объема)	С/Б	64 - 256	100

Вероятность ошибки одной длинной операции (умножения, деления), включающая вероятности от программных, сбойных и вводных ошибок, будет $2 \cdot 10^{-6}$, а вероятность ошибки выполнения короткой операции (пересылка, обращение к памяти и т.д.) приближена к возможной верхней границе надежности программного обеспечения и составляет $1{,}2 \cdot 10^{-8}$.

Требования надежности к перспективным системам информационного обмена задают вероятностью разрядной ошибки передачи информации не более 10^{-12} ошибки на бит.

Т а б л и ц а 13.2 - Зависимость надежности программного обеспечения от продолжительности работы системы

Число лет работы	0	1	2	3	4	5	6	Более 6
$K_р$	2	1	0,2	0,1	0,05	0,03	002	0,01

Т а б л и ц а 13.3 - Зависимость надежности программного обеспечения от уровня загруженности системы

Начальное качество	$K_к$	Ремонтопригодность и частота изменений	$K_и$	Уровень загруженности и пользовательские изменения	$K_з$
Низкое	2	Низкая	2	Очень низкое	0,25
Среднее	1	Средние	1	Низкие	0,5
Довольно высокое	0,5	Довольно высокая	0,25	Средние	1
Высокое	0,25	Высокие	0,5	Высокие	2
				Очень высокие	4

Интенсивность отказов программного обеспечения $\lambda_п$ определяется с помощью таблиц 13.1 – 13.3 по выражению

$$\lambda_п = \lambda K_р K_к K_и K_з. \qquad (13.3)$$

14 Лекция № 14. Внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность

Содержание лекции: рассматриваются внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность электронных приборов и систем.

Цель лекции: обучение оценке степени влияния на надежность приборов и систем внешних факторов.

14.1 Внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность автоматизированных систем управления в приборостроении

Рассмотрим влияние на надежность систем автоматизированного управления климатических, механических, радиационных факторов и воздействия со стороны обслуживающего персонала.

Основными климатическими факторами окружающей среды являются: солнечная радиация, температура и относительная влажность воздушной среды, ее плотность, движение, наличие в ней твердых и газообразных примесей; снег, дождь, туман, иней, роса.

Солнечная радиация является одним из основных климатических факторов. В спектре излучаемой солнечной энергии около 9% приходится на ультрафиолетовую часть, около 50% - на видимую часть спектра и около 41% - на инфракрасные волны.

Для характеристики условий эксплуатации изделий определены три уровня концентрации пыли: 0,18; 1.0 и 2,0 г/м^3. Из газообразных примесей в воздухе наиболее опасными являются сернистый газ и хлористые соли.

Плесневые грибки, попадая в аппаратуру, способны разлагать высокомолекулярные соединения как естественного, так и искусственного происхождения.

14.2 Влияние изменения температуры.

Повышение температуры вызывает ускорение протекания химических реакций. Под влиянием периодических тепловых воздействий происходит деформация элементов конструкций, обусловленные различными механическими повреждениями.

Параметры полупроводниковых приборов заметно изменяются даже при сравнительно небольших положительных температурах (выше 40 - 50° С). Изоляционные материалы с большой диэлектрической проницаемостью также сильно зависят от их температуры. Удельное объемное сопротивление полярных пластмасс с повышением температуры резко падает.

Под действием тепла механическая прочность изоляции уменьшается; электрическая прочность вначале увеличивается по причине удаления из материала влаги, а затем уменьшается до ее первоначального значения, и в итоге изоляция постепенно разрушается.

Электрическая прочность пластмасс пропорциональна их сопротивлению в степени от 0,34 до 0,14. При низких температурах у слоистых и волокнистых фенопластов сильно снижается ударная прочность.

14.3 Влияние влажности

Под действием влаги у металлических поверхностей изменяется цвет, степень шероховатости, электропроводность, поверхностная прочность и т. п.

Латунные детали в местах больших механических напряжений (в местах изгибов с малыми радиусами и в местах вытяжки) под действием повышенной влажности ломаются.

Сварные соединения, если они недостаточно защищены от действия влаги, корродируют и расширяются в местах сварки металлов.

Вредное действие оказывает влага в виде конденсата на поверхностях деталей систем, образующего при быстром изменении температуры.

Использование благородных металлов и их сплавов не гарантирует отсутствие отказов в работе приборов в условиях повышенной влажности.

Вода в чистом виде обладает большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 81$), поэтому даже при относительно малом объеме в материале она может вызвать изменение его диэлектрической проницаемости в несколько раз.

В результате может изменяться частота колебательных контуров и уменьшаться их добротность, что, в свою очередь, повлечет за собой расширение полосы частот, ухудшение стабильности работы генераторов или уменьшение выходного напряжения элементов с частотно зависимыми характеристиками.

14.4 Механические воздействия

Механические воздействия на различные элементы и системы управления могут происходить как в процессе эксплуатации, так и при траспортировке. Различают два вида механических воздействий: удары и вибрация.

Удар возникает в тех случаях, когда устройства претерпевают быстрое изменение ускорения. От ударов могут происходить разрушения слабых элементов конструкций или элементов, находящихся под механическим напряжением.

Действие ударов в условиях пониженной температуры вызывает значительно больше повреждений конструкций, чем в нормальных условиях работы, из-за повышенной хрупкости многих изоляционных материалов, а также возникающих при охлаждении напряжений в отдельных частях конструкций различных систем.

Вибрации представляют собой периодические колебания (чаще сложные), которым подвергаются устройства и системы управления. Вызывают они обычно те же последствия, что и удары.

Опасность их состоит в том, что длительное действие вибрации приводит к разрушению элементов конструкций за счет явлений усталости, которая при знакопеременных нагрузках проявляется в большей степени, чем при статических нагрузках.

Например, при длительном воздействии вибрации разбалтываются винтовые и расшатываются заклепочные соединения, а сварные просто разрушаются.

Монтажные провода, жгуты и кабели при вибрации могут обрываться, особенно, если отдельные негибкие провода сильно натянуты или попадают в механический резонанс.

Очень низкие частоты вибрации (несколько Гц) могут приводить к обрыву трансформаторов, блоков, электрических конденсаторов т.п.

14.5 Воздействие проникающей радиации

Движение заряженных частиц большой энергии в веществах приводит к потере энергии, затрачиваемой ими почти полностью на возбуждение связанных электронов.

Наиболее устойчивы к воздействию облучения металлы. У электротехнической стали и магнитных материалов также заметно изменяется магнитная проницаемость, а некоторые металлы (бор, марганец, кобальт, цинк и др.) после облучения нейтронами сами становятся радиоактивными.

Например, облучение резисторов приводит к увеличению уровня шумов, ухудшению влагостойкости. У конденсаторов после облучения изменяется электрическая прочность, емкость тангенс диэлектрических потерь.

Наименее радиационностойки полупроводниковые приборы и интегральные схемы, резко возрастают токи утечки, появляется множество паразитных связей между элементами, что приводит к нарушению нормальной работы интегральных схем.

Защищать аппаратуру от ионизированных излучений можно различными видами экранирования и специальными светотехническими мерами по защите основных узлов от перегрузок, возникающих в них под действием ионизационных потоков.

14.6 Влияние человеческого фактора

Принятая на этапе разработки концепция обеспечения требуемого уровня надежности и безопасности определяет структуру системы и «цену» обеспечения надежности.

Некоторые ошибки разработки или типового проекта могут проявиться даже после длительной эксплуатации системы.

Ошибки персонала, обслуживающего системы, могут приводить к весьма тяжелым последствиям.

Сложность разрабатываемых систем вступает в противоречие с возможностями человека как разработчика, отсюда ошибки разработки и эксплуатации; ограниченные возможности человека невсегда согласовываются с техническим потенциалом разработанных систем в части

нагрузки оперативного персонала и реализации интерфейса «оператор-система»; повышение уровня автоматизации систем приводит к ослаблению профессиональных навыков оперативного и технического персонала.

15 Лекция №15. Внутренние факторы

Содержание лекции: классификация факторов *влияющих* на надежность.

Цель лекции: ознакомление с понятием надежность систем управления и ее факторами .

Внутренние факторы связаны со спецификой аппаратуры, ее загруженностью и условиями эксплуатации, что приводит к постепенному физическому износу элементов и узлов системы.

Кроме физического износа, системы претерпевают также моральный износ, который обуславливается появлением более современных систем, на новой элементной базе и улучшенными техническими характеристиками.

Чаще всего в системах управления и контроля ранее наступает моральный износ, а затем появляется физический, обусловленный многими факторами, среди которых не последнее место занимает усталость металла, которая появляется при длительных сроках эксплуатации.

Обобщенно, в графическом варианте внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность систем, приведены на рисунке 14.1. Надежность сложных систем зависит от разнообразных факторов, раздельное и комплексное изучение которых необходимо, поскольку без раскрытия физической природы отказов затруднительно выбрать наиболее подходящие направления работ по обеспечению и повышению надежности как отдельных видов оборудования, так и систем в целом. Все множество факторов, *влияющих на оборудование* сложных систем, принято классифицировать по области их действия.

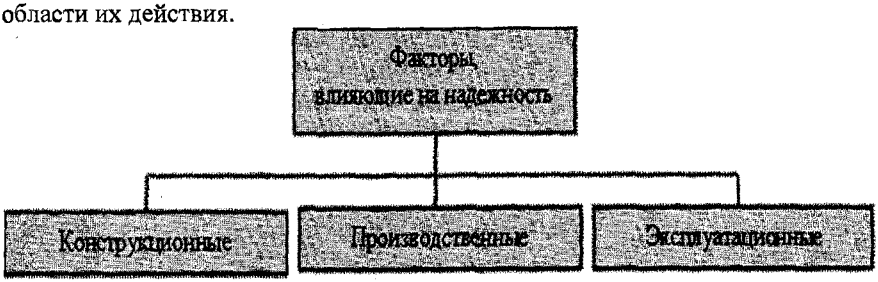


Рисунок 14.1 – Факторы, влияющие на надежность

Конструкционные факторы непосредственно связаны с действиями конструкторов в процессе проектирования и конструирования систем, ведь именно они разрабатывают структурную, функциональную,

принципиальную и др. схемы системы, рассчитывают (выбирают) материалы и элементы системы, разрабатывают технологию изготовления системы и ее элементов, а также и систему эксплуатации и т.д.

При проектировании системы выбирается принцип ее работы и структура. Осуществляется конструктивная разработка отдельных узлов и приборов. Если на стадии проектирования не будут учитываться данные факторы, связанные с надежностью системы, и тем более, если будут допущены неточности в проектировании, то обеспечить надежность системы за счет мер, принимаемых на двух последующих этапах (производстве и эксплуатации), весьма трудно. Это потребует больших материальных затрат, а в некоторых случаях даже практически невозможно. На этом этапе главное внимание должно быть обращено на выбор наиболее простой системы, имеющей, по возможности, наименьшее число элементов и связей между ними. Это требование подтверждается тем, что в нерезервированных системах вероятность отказа системы в первом приближении пропорциональна количеству элементов. Наряду с выбором простой схемы, оцениваемой приближенно по количеству элементов, большое влияние на надежность системы имеет выбор стабильной схемы. В стабильной, по принципу действия, схеме обычно наблюдаются минимальные связи между параметрами отдельных элементов, а также обеспечивается минимальное влияние отклонений параметров элементов на величину ошибки в выходной величине системы. Таким образом, выбор простой и стабильной по принципу действия схемы является одной из главных мер обеспечения высокой надежности системы, как при внезапных, так и при постепенных отказах. Еще большие возможности повышения надежности могут представиться в результате применения самоорганизующихся систем, в которых при отказах отдельных элементов или изменении внешних условий изменяется структура системы, перераспределяются функции между ее отдельными элементами.

Вероятность отказа нерезервированной системы в первом приближении равна сумме вероятностей отказов элементов. Следовательно, безотказность нерезервированных систем зависит не только от количества элементов, но и от безотказности элементов и режимов их работы. Для обеспечения высокой безотказности (низкой интенсивности отказов) при проектировании системы надо выбирать наиболее качественные и перспективные элементы. Поэтому при проектировании для повышения безотказности системы режимы работы элементов нужно выбирать значительно меньшими, чем номинальные, при этом степень уменьшения нагрузок зависит от конкретных задач.

Большое влияние на безотказность системы оказывают условия ее работы, а именно: воздействующие на систему и элементы механические, климатические и др. нагрузки. При проектировании системы необходимо максимально уменьшить влияние внешних и внутренних нагрузок на систему и ее элементы. Эта задача, в основном, решается правильным

выбором конструкции узлов, приборов и системы в целом. В качестве дополнительных конструктивных мер, обеспечивающих повышение безотказности, можно указать на методы снижения влияния механических нагрузок путем применения специальных конструктивных форм устройств, амортизаторов и т.д. Влияние климатических нагрузок может быть в значительной степени ослаблено при правильном конструктивном оформлении узлов и блоков, например, с таким расчетом, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу (искусственное охлаждение), защиту от влаги (герметизация). Немаловажную роль играет и выбор материалов, которые должны обладать требуемыми физико-механические, прочностные и др. характеристиками.

При разработке схемы и конструкции должны также быть предусмотрены меры, позволяющие обеспечить надежность системы при эксплуатации, а именно: блочная конструкция системы, применение стандартных и унифицированных узлов и блоков, удобство проверок, ТО и ремонта и др.

К *производственным факторам* следует отнести факторы обусловленные организацией технологического процесса производства системы и ее элементов, а также процесса технического контроля. Соблюдение установленных технологических процессов должно начинаться с входного контроля материалов и изделий, применяемых в системе, обеспечении при необходимости качественной замены материалов. В ряде случаев причиной низкой надежности выпускаемых систем может быть загрязненное содержание оборудования и рабочих мест. Важным методом повышения надежности систем является правильная организация производственного контроля и уровень культуры производства. Особый вред надежности системы наносится скрытыми производственными дефектами в результате нарушения технологического процесса. Обычно скрытые дефекты представляют наибольшие трудности при техническом контроле. Наряду с техническим контролем надежность сложных систем может быть существенно повышена, особенно для начального периода эксплуатации, проведением тренировочных испытаний системы (приработки) в производственных условиях. Это позволяет устранить большинство производственных и скрытых отказов, если приработка системы проходит при больших, по сравнению с номинальными, нагрузками.

Основные *эксплуатационные факторы*, влияющие на надежность: воздействия окружающей среды, условия эксплуатации системы и квалификация обслуживающего персонала.

К факторам окружающей среды в первую очередь следует отнести климатические (температура, влажность, давление, радиация и др.) условия, при которых эксплуатируется система.

Правильная организация эксплуатации системы является одним из решающих факторов обеспечения надежности. Большое значение имеет и

своевременное проведение профилактических мероприятий, позволяющих предупредить появление отказов системы в рабочий период времени. Одним из современных методов профилактики является прогнозирование отказов, позволяющее своевременно заменить так называемые критические элементы и тем самым исключить их отказы. Естественно, что полностью исключить отказы в период эксплуатации не удается, поэтому необходимо построить систему эксплуатации (ТО и ремонт, снабжение ЗИП и др.) объекта таким образом, чтобы обеспечить минимальное время восстановления отказавшей системы.

Таким образом, требуемая надежность системы может быть обеспечена только комплексом методов, применяемых на всех этапах ее жизненного цикла.

15.1 Требования к информации

Информация, полученная при испытаниях на надежность в условиях эксплуатации имеет ряд специфических особенностей по сравнению с полученной в лабораторных испытаниях.

Эти особенности вызваны изменениями во времени внешних воздействий, случайным моментами включений и отключений автоматизированных систем управления (АСУ) в целом, ее подсистем и отдельных средств.

Основными требованиями, предъявляемыми к информации об эксплуатационной надежности, являются *достоверность, полнота информации и оперативность.*

Достоверность информации заключается в требовании к объективности всех сообщаемых сведений и обеспечивается как ответственностью и компетенцией лиц, ведущих сбор данных, так и системой контроля сбора этих сведений.

Полнота информации заключается в том, чтобы получаемая информация как по числу испытываемых систем и длительности испытаний, так и по объему сведений об условиях работы, причинах отказов, способах восстановления работоспособности систем была достаточной для решения поставленных задач.

Оперативность информации необходима для скорейшего принятия мер по воздействию на процесс разработки и изготовления систем и их компонентов.

Информацию, полученную при эксплуатации, можно рассматривать как обратную связь в системе управления надежностью.

Обеспечение этих требований к информации должно сочетаться с минимальной трудоемкостью и стоимостью сбора.

Это имеет место, если сбор информации о надежности проводит персонал, непосредственно занимающийся эксплуатацией

автоматизированных систем управления, и используется дополнительная документация и литература.

Для обеспечения требуемого качества информации при проведении сбора данных о надежности обслуживающим персоналом необходим ряд организационно – технических мероприятий.

Все эти работы можно разделить на четыре группы:

а) предшествующие сбору информации;

б) проводимые во время сбора информации;

в) предварительная обработка информации;

г) окончательная обработка полученной информации.

Список литературы

1 Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. - М.: «Академия», 2010 г.

2 Григорьян С.Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники.- Ростов-на-Дону, 2007.

3 Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. -Москва.2008.

4 Малафеев С.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи. – ПСб.: «Лань», 2012 г.

5 Бычков А.А. Надежность приборов и систем. – Учебное пособие. – Ростов на Дану ., 2008.- 84с.

Содержание

Введение 1
1 Лекция №1. Основные положения теории надежности 3
2 Лекция №2. Надежность невосстанавливаемых систем 6
3 Лекция №3. Основные законы распределения наработки до отказа 14
4 Лекция №4. Надежность восстанавливаемых систем 18
5 Лекция № 5. Методы расчета надежности по различным структурным схемам 22
6 Лекция №6. Основные понятия о резервировании 27
7 Лекция №7. Сложные виды резервирования 30
8 Лекция №8. Расчет надежности восстанавливаемых систем в динамике 35
9 Лекция № 9. Планы испытаний 43
10 Лекция №10. Методы повышения показателей надежности 51
11 Лекция №11. Надежность программного обеспечения 56
12 Лекция №12. Методы повышения надежности программного обеспечения 59
13 Лекция № 13. Статистические показатели надежности программного обеспечения 62
14 Лекция № 14. Внешние и внутренние факторы, влияющие на надежность 65
15 Лекция № 15. Внутренние факторы 69
Список литературы 74

Сводный план 2016 г., поз.266

АкполпанАуелбековна Копесбаева

НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Конспект лекций для студентов специальности
5В071600 - Приборостроение

Редактор Л.Т. Сластихина
Специалист по стандартизации Н.К.Молдабекова

Подписано в печать 12.05.16г
Тираж 80 экз.
Объем 4,7 уч.-изд.л.

Формат 60х84 1/16
Бумага типографская №1
Заказ 154 цена 2350 тн.

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, Байтурсынова, 126