

А.И. Васильев

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ  
АГРОПРОМА**

Текст лекций

Санкт-Петербург  
2008

**Федеральное агентство по образованию**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



**А.И. Васильев**

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ  
АГРОПРОМА**

**Текст лекций**

**Второе издание, исправленное**

**Санкт-Петербург  
2008**

Васильев А.И. Надежность технических средств автоматизации предприятий Агропрома: Текст лекций. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 45 с.

Изложены основные понятия надежности и ее функциональные характеристики; приведены основные законы распределения времени безотказной работы технических средств автоматизации; рассматривается методика расчета надежности устройств при основном соединении их элементов; дано понятие о методе повышения надежности устройств путем резервирования.

Пособие предназначено для студентов специальности 220301 и направления 220200. Может быть использовано для выполнения курсового и дипломного проектирования, включающего материалы по анализу надежности систем контроля, регулирования и управления.

#### Рецензенты

А.Н. Копгенов (главный конструктор проектно-конструкторского института «Пищегарпромавтоматика»)

Г.А. Соколов (профессор, доктор техн. наук, зав. кафедрой автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского технологического института (технического университета))

Г.Н. Никищенко (канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского технологического института (технического университета))

Рекомендован к изданию редакционно-издательским советом университета

© Ленинградский технологический  
институт холодильной  
промышленности, 1989  
© Санкт-Петербургский государственный  
университет низкотемпературных  
и пищевых технологий, 2008

#### ПРЕДИСЛОВИЕ

Для пищевых производств характерно разнообразие технологических процессов, что предопределяет применение обширной номенклатуры приборов и средств измерений технологических параметров, а также систем автоматического регулирования и управления.

На предприятиях Агропрома все шире и глубже внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), автоматизированные рабочие места (АРМ), цифровые автоматические системы, реализуемые на базе микропроцессорных комплексов, которые осуществляют централизованное управление параметрами технологических процессов, формируя управляющие воздействия на соответствующие локальные устройства.

Одним из показателей высокой эффективности функционирования приборов и устройств, а тем более сложных систем управления, является надежность. Работа датчиков, первичных и вторичных преобразователей, других приборов и устройств в условиях пищевых предприятий имеет специфические особенности, которые существенно влияют на надежностные характеристики этих приборов в период их эксплуатации.

#### I. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

##### I.I. Понятие о физической сущности надежности

Технический прогресс во всех областях возможен только при наличии технических средств высокого качества. Важной составляющей качества изделия является его надежность, под которой в первом приближении следует понимать способность изделия сохранять свои технические характеристики длительное время как в период эксплуатации, так и в периоды складирования, хранения и транспортировки.

Для повышения надежности изделий необходимо изучить ее физическую сущность. Надежность работы всей технической системы, состоящей из отдельных изделий, закладывается на трех стадиях ее реализации: проектирования, изготовления и эксплуатации.

На стадии проектирования необходимо разрабатывать качественный проект изделий и системы в целом: их конструкции либо электрические схемы должны быть технологичными, включать в себя типовые высоконадежные элементы и узлы, к которым должен быть обеспечен легкий до-

ступ на случай ремонта изделий. При разработке элементов и узлов полупроводниковой техники (диодов, тиристоров, транзисторов, микросхем, БИСов) предъявляются высокие требования к чистоте полупроводниковых материалов; при разработке элементов и узлов струйной техники предъявляются высокие требования к чистоте обработки каналов элементов. Эти факторы должны быть оговорены и учтены на стадии проектирования.

На стадии изготовления необходимо строго соблюдать технологическую дисциплину, контролировать качество выполнения отдельных операций и монтажа системы в целом.

На стадии эксплуатации необходимо соблюдать все условия эксплуатации, своевременно проводить профилактические работы по техническому обслуживанию системы, допускать к эксплуатации только обученный обслуживающий персонал соответствующей квалификации.

Степень надежности еще не определяет высокого класса качества изделий, которые могут быть исключительно надежными, но обладать очень низкими техническими характеристиками: малыми точностью и производительностью. Надежность – это одна из обязательных составляющих качества любого технического изделия, но в отличие от других составляющих качества она тесно связана со всеми техническими характеристиками изделия, хотя эти технические характеристики между собой могут быть несвязанными. Например, станок может иметь высокий уровень автоматизации, но малую точность обработки; автомобиль может иметь высокую скорость, хорошую проходимость, но очень большой расход горючего. Надежность же тесно связана со всеми свойствами изделия. Действительно, если станок имеет высокую производительность, высокую точность, но часто выходит из строя, т.е. имеет низкую надежность, то последнее перечеркивает все его достоинства.

Следовательно, надежность является комплексным свойством, характеризующим любое техническое изделие. По мере развития и совершенствования техники, усложнения выполняемых ею функций значение ее надежности все более возрастает.

## 1.2. Основные понятия теории надежности

В зависимости от целевого назначения и специфики работы все технические изделия классифицируются на:

- изделия однократного применения;
- изделия многократного применения.

Изделия однократного применения не обслуживаются при непосредственном использовании и не ремонтируются в случае возникновения отказа. Примером таких изделий могут быть подшипники, многие первичные преобразователи, электронные элементы регуляторов, микросхемы и др. Технический ресурс такого изделия равен периоду его работы и определяется как разность между временем окончания работы и временем ее начала

$$T_{\text{pec}} = t_K - t_H. \quad (I.1)$$

Изделие многократного применения включается в работу по мере необходимости неоднократно, а общая совокупность его работы от начала до конца эксплуатации составляет суммарную наработку изделия. Эти изделия в период эксплуатации проходят периодические проверки, техническое обслуживание и в случае отказов восстанавливаются.

Суммарная наработка изделия от начала его эксплуатации до ее прекращения, обусловленного изнашиванием или старением, называется техническим ресурсом по наработке.

$$T_{\text{pec}} = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad (I.2)$$

где  $n$  – общее число сеансов работы изделия за все время эксплуатации  $t_{pi}$ .

Примером механизмов многократного применения могут быть компрессоры цехов для выработки холода, технологическое оборудование на пищевом предприятии.

Изделия как однократного, так и многократного применения состоят из отдельных частей, которые в зависимости от сложности и важности можно разделить на: элемент, устройство, систему, комплекс. Элементом называют законченную конструкцию, которая не имеет самостоятельного эксплуатационного применения (транзистор, резистор, диод и т.д.). Элемент может включать в себя несколько деталей, каждая из которых представляет собой изделие, не подлежащее разборке и даже не имеющее самостоятельного применения. Устройство – это совокупность элементов, имеющая определенное целевое применение и логически законченную конструкцию. Сюда можно отнести насосы, компрессоры, запорную арматуру, исполнительные механизмы, вторичные приборы и т.д. При расчете на надежность часто сложное устройство представлено в виде совокупности функциональных узлов. Функциональный

узел - это часть схемы, устройства, обладающая вполне определенной выходной реакцией на заданные входные воздействия. Примером могут служить различные электроприводы. Системой называется совокупность взаимодействующих устройств, предназначенная для решения одной или нескольких задач. Сюда можно отнести локальную систему управления каким-либо технологическим процессом на пищевом предприятии. Комплексом называют связанную совокупность систем, призванную решать общую многоцелевую задачу. Примером может служить АСУТП либо АСУП, включающие в себя ряд локальных систем, призванных решать общие технические или экономические задачи в масштабах всего предприятия, объединения, отрасли.

Прежде чем переходить к основному определению рассмотрим некоторые понятия, связанные с теорией надежности. В определении надежности существует три важнейших элемента: работоспособность изделия; время, в течение которого изделие выполняет эти функции; условия эксплуатации, при которых может быть обеспечено выполнение заданных функций.

Работоспособность - это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации. Работоспособность нельзя путать с исправностью, так как любое изделие считается неисправным, если оно не соответствует хотя бы одному (любому) требованию технической документации [5]. Понятие исправности шире понятия работоспособности.

Время. Ни одно, даже самое совершенное изделие, не может сохранять свои первоначальные свойства неограниченное время, а это означает, что оценивать надежность можно только для какого-то конкретного временного промежутка.

Условия эксплуатации - наиболее важный фактор реальной надежности. Показания прибора, испытываемого в лабораторных условиях, могут отличаться от показаний прибора, работающего в реальных условиях. Поэтому стараются при испытании образца на надежность максимально приблизить условия его эксплуатации к реальным. Поправочный коэффициент на надежность при работе в реальных условиях может изменяться в пределах  $1\dots 2 \cdot 10^3$ .

Определение понятия надежности дано в ГОСТ 27.003-83: "Под надежностью понимается свойство объекта, входящее в совокупность свойств, определяющих его качество, и обусловливаемое безотказнос-

тью, сохраняемостью и долговечностью объекта". Кроме того, надежность определяется таким свойством, как ремонтопригодность.

Под безотказностью понимают свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов при его эксплуатации в заданных условиях. При этом надежность нельзя полностью отождествлять с безотказностью. Вообще говоря, безотказность - это стопроцентная надежность за данный промежуток времени. Важно, например, чтобы сельскохозяйственная техника работала безотказно 3-4 недели в году, а дальше она может вставать на длительный ремонт.

Конечно, хорошо, если бы изделие было безотказным как можно дольше, но это связано уже с другой характеристикой надежности, которая называется долговечностью. Долговечность - это свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. В зависимости от вида изделия на первый план в характеристике надежности может выдвигаться либо безотказность (ракета-носитель), либо долговечность (битовая техника).

Все изделия могут быть подразделены на ремонтируемые и неремонтируемые (восстанавливаемые и невосстанавливаемые). Ремонтируемые - это такие изделия, у которых работоспособность в случае отказа может быть восстановлена путем ремонта, выполняемого подручными средствами. Такие изделия могут иметь несколько отказов. Неремонтируемые изделия - это такие изделия, работоспособность которых в случае отказа не поддается восстановлению. Такие изделия после первого отказа подлежат замене (радиодетали, лампы и т.д.). Для неремонтируемых изделий понятия "безотказность" и "долговечность" совпадают.

Следует отметить, что безотказность и долговечность не исчерпывают полностью понятия "надежность". Например, пусть работают два агрегата с одинаковым числом отказов за один и тот же период, но времени на ремонт для первого агрегата требуется значительно больше, чем для второго (например, из-за несовершенства конструкции первого агрегата). Можно ли считать, что надежность этих двух агрегатов одинакова? Нет. Нужно еще ввести понятие "ремонтопригодность". Ремонтопригодность - это свойство изделия, заключающееся в его при-

способности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонта. Чем сложнее изделие, тем большее значение приобретает ремонтопригодность.

Потеря работоспособности изделий может происходить не только в период эксплуатации, но и в период хранения, поэтому следующей важной характеристикой надежности является сохраняемость. Сохраняемость – это свойство изделия не утрачивать эксплуатационные показатели, установленные в технической документации, в течение времени хранения и транспортировки.

Таким образом, говорить о надежности изделия можно только с учетом вышеперечисленных его свойств, указывая ремонтопригодность, долговечность, работоспособность, безотказность, сохраняемость, условия и время эксплуатации.

### 1.3. Отказы и их классификация

Любое изделие может находиться в одном из двух состояний: быть работоспособным либо неработоспособным. События, заключающиеся в нарушении работоспособности изделия, называются отказом. Физическая сущность отказов может быть самой разнообразной: поломка детали, износ узла, функционирование устройства, но с параметрами, нарушающими пределы поля допуска. Все отказы делят на две категории: постепенные (медленный износ шины) и внезапные (гвоздь проткнул шину автомобиля).

Причинами постепенного отказа являются износ и старение. Постепенные отказы сравнительно легко предотвратить путем своевременной замены изношенных деталей оборудования при профилактическом осмотре. Иное дело – внезапные отказы, которые, как правило, связаны с концентрацией нагрузок в данном месте цепи агрегата. Причиной внезапных отказов изделий могут быть также и неправильные действия обслуживающего персонала. Внезапный отказ является случайным событием, т.е. он может произойти, но может и не произойти. Постепенный отказ – это закономерное событие и вероятность его появления равна единице, но неизвестно точное время появления. Поэтому постепенный отказ нельзя рассматривать как случайное событие, хотя само время наступления постепенного отказа является случайной величиной. Можно провести аналогию между техникой и живым организмом. Смерть живого организма от старости – это явление неизбежное и достоверное; когда же это произойдет – точно предсказать

невозможно. Это случай постепенного отказа. Другое дело – внезапная болезнь и живой организм погибает. Это случай внезапного отказа.

Отказы могут быть зависимыми и независимыми, причем независимый отказ – событие первичное, а зависимый – вторичное по отношению друг к другу. В зависимости от возможности использования изделия после отказа, последние могут быть полными и частичными. По характеру проявления отказы могут быть устойчивыми и неустойчивыми (сбои). Устойчивые отказы могут проявляться периодически через определенные промежутки времени. Собою называют отказ, время существования которого значительно меньше времени безотказной работы.

Следующим классификационным признаком является причина возникновения отказов: конструкционные отказы вызваны несовершенством конструкции, что приводит к нарушению теплового или влажностного режима работы при механических нагрузках и вибрациях; схемные отказы вызваны ошибками, допущенными при выборе схемных решений; технологические отказы вызваны несовершенством сборки, монтажа и регулировки изделия; эксплуатационные отказы вызваны неправильным применением изделия, ошибками обслуживающего персонала и т.д.

### 1.4. Функциональные характеристики надежности

Для оценки надежности аппаратуры необходимо несколько функциональных характеристик, которые могут иметь количественную оценку. К таким характеристикам относятся: вероятность безотказной работы, частота отказов, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, коэффициенты надежности.

Вероятностью безотказной работы аппаратуры называется вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации в пределах заданной продолжительности работы отказов не возникает, т.е.

$$P(t) = P[T_1 > t], \quad (1.3)$$

где  $T_1$  – время от момента включения аппаратурь до ее отказа;  
 $t$  – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

Типичная зависимость вероятности безотказной работы во времени показана на рис. I.1, из которого следует, что  $P(t)$  является убывающей функцией времени, причем  $0 \leq P(t) \leq 1$ ;  $P(0) = 1$ ;  $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$ . Выражение для  $P(t)$  может быть получено как аналитическим путем, так и экспериментальным (статистическим). При статистической оценке

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (I.4)$$

где  $N_0$  - число образцов аппаратуры в начале испытания;  
 $n(t)$  - число отказавших образцов за время  $t$ .

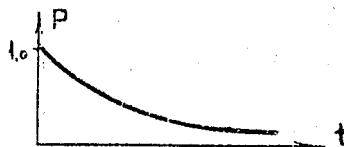


Рис.I.1

При большом значении  $N_0$  статистическая оценка стремится к вероятности безотказной работы  $\bar{P}(t) \rightarrow P(t)$ . На практике часто используют другую характеристику, которая называется вероятностью отказа

$$\Omega(t) = 1 - P(t), \text{ или } \Omega(t) = P(T_i \leq t), \quad (I.5)$$

т.е.  $\Omega(t)$  - это интегральная функция распределения времени работы  $T_i$  изделия до отказа.

$$\Omega(t) = F(t), \quad (I.6)$$

а производная от функции распределения есть плотность распределения

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \Omega'(t). \quad (I.7)$$

При статистическом определении вероятности отказа можно воспользоваться выражением

$$\Omega(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (I.8)$$

Функция вероятности безотказной работы широко используется при анализе надежности в силу следующих своих достоинств:

- она характеризует изменение надежности во времени;
- является обобщенной характеристикой, охватывающей большинство факторов, влияющих на надежность аппаратуры;

- является удобной характеристикой надежности как простейших элементов, так и сложных систем.

Основные недостатки этой функции:

- характеризует надежность восстанавливаемых систем только до первого отказа, а поэтому является полной характеристикой надежности лишь для систем разового использования;

- по известной  $\Omega(t)$  бывает трудно вычислить другие количественные оценки характеристик надежности.

Частотой отказов называется отношение числа отказавших образцов аппаратурь в единицу времени к числу образцов, первоначально установленных на испытание при условии, что отказавшие образцы не восстанавливаются и замене не подлежат, т.е.

$$\bar{\Omega}(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (I.9)$$

где  $\bar{\Omega}(t)$  - функция частоты отказов;

$n(t)$  - число отказавших образцов;

$\Delta t$  - интервал времени испытания.

Частота отказов имеет зависимость во времени, которая показана на рис.I.2.

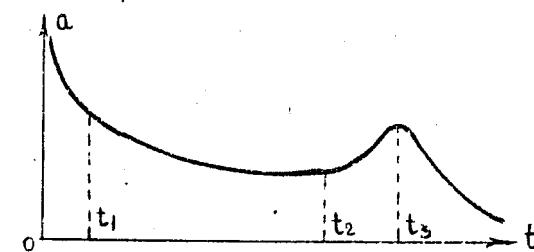


Рис.I.2

На этом графике можно выделить три характерных участка:

I. Участок  $0 \dots t_1$ , на котором частота отказов резко уменьшается. Начальная высокая частота отказов обусловлена приработкой деталей аппаратуры, низкая надежность которых объясняется наличием элементов с внутренними дефектами. Этот участок часто образно называют "детствием аппаратуры". В процессе эксплуатации этот этап может отсутствовать.

2. Участок  $t_1 \dots t_2$ , на котором частота отказов уменьшается по экспоненциальному закону. Этот участок характеризует нормальную работу аппаратуры. Уменьшение частоты отказов с течением времени не означает повышение надежности системы: просто уменьшается число отказавших элементов  $\Delta n$  за время  $\Delta t$ , так как уменьшается число самих образцов. В действительности надежность аппаратуры с течением времени падает.

3. Участок  $t_2 \dots t_3$  характеризуется резким ростом частоты отказов, что объясняется механическим или электрическим износом элементов.

Уменьшение числа отказов после  $t_3$  объясняется не повышением надежности аппаратуры, а незначительным количеством исправно работающих к этому времени образцов, а значит  $\Delta n(t)$  за  $\Delta t$  резко уменьшается.

Дадим вероятностное определение характеристики  $Q(t)$ .

$$n(t) = [N(t) - N(t + \Delta t)] = -[N(t + \Delta t) - N(t)], \quad (I.10)$$

где  $N(t)$ ,  $N(t + \Delta t)$  – число образцов, исправно работающих к моменту  $t$  и  $(t + \Delta t)$  соответственно.

При большом числе образцов  $N_0$

$$\left. \begin{aligned} N(t) &= N_0 P(t), \\ N(t + \Delta t) &= N_0 P(t + \Delta t). \end{aligned} \right\} \quad (I.11)$$

Подставив (I.10) в (I.9) и учитывая (I.11), получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t)}{\Delta t} = -\frac{N_0 [P(t + \Delta t) - P(t)]}{N_0 \Delta t} = -P'(t). \quad (I.12)$$

Или с учетом (I.5)

$$Q(t) = [Q(t) - 1]' = Q'(t), \quad (I.13)$$

т.е. частота отказов есть плотность распределения времени работы аппаратуры до ее отказа и численно равна производной от вероятности безотказной работы с обратным знаком.

Таким образом, между частотой отказов, вероятностью безотказной работы и вероятностью отказов при любом законе распределения времени возникновения отказов существуют однозначные зависимости,

которые на основании (I.13) и (I.5) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= \int_0^t q(t') dt, \\ P(t) &= 1 - \int_0^t q(t') dt \end{aligned} \right\} \quad (I.14)$$

Частота отказов, являясь плотностью распределения, наиболее полно характеризует такое случайное явление, как время возникновения отказов. Если известна функция  $Q(t)$ , то всегда можно получить такие характеристики распределения, как математическое ожидание, дисперсию и моменты более высокого порядка.

Недостатки функции  $Q(t)$  в том, что она используется только для оценки надежности аппаратуры, которая после возникновения отказа не ремонтируется. В противном случае этот показатель характеризует надежность изделий до первого отказа.

Надежность аппаратуры многократного пользования можно характеризовать частотой отказов, полученной при условии замены отказавшей аппаратуры исправной. При этом структура формулы (I.9) не изменяется, но меняются ее составляющие. В этом случае вводят понятие средней частоты отказов, равной отношению числа отказавших образцов в единицу времени к числу испытываемых образцов при условии, что все образцы, вышедшие из строя, заменяются исправными.

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (I.15)$$

где  $n(t)$  – число отказавших образцов за время  $\Delta t$ ;

$N_0$  – число испытываемых образцов.

Определим связь между  $Q(t)$  и  $\omega(t)$ . Из (I.15) следует, что

$$n(t) = N_0 \omega(t) \Delta t, \quad (I.16)$$

причем  $n(t) = n_1(t) + n_2(t)$ , где  $n_1(t)$  – количество отказавших образцов из числа тех, которые были поставлены на испытание в момент  $t = 0$ ;

$n_2(t)$  – количество отказавших образцов из числа замененных в процессе испытания за время  $0 \dots t$ .

Очевидно, что

$$n_1(t) = Q(t) N_0 \Delta t. \quad (I.17)$$

Вычислим  $N_2(t)$ . Пусть  $\tau$  и  $\tau + \Delta\tau$  - некоторые промежутки времени, предшествующие промежуткам  $t$  и  $t + \Delta t$ , т.е.  $\tau < t$ . Очевидно, что за промежуток  $\Delta\tau$  выйдет из строя  $N_0 \omega(\tau) \Delta\tau$  образцов. Эти образцы будут заменены, и в промежутке  $\Delta t$  из их числа в среднем откажет

$$[N_0 \omega(\tau) \Delta\tau] \alpha(t-\tau) \Delta t \quad (I.18)$$

образцов. Для определения  $N_2(t)$  нужно просуммировать (I.18) по всем промежуткам  $\Delta\tau$ , предшествующим  $t$ , т.е.

$$N_2(t) = N_0 \Delta t \int_c^t \omega(\tau) \alpha(t-\tau) d\tau \quad (I.19)$$

Подставляя (I.17) и (I.19) в (I.16) и сокращая на  $N_0 \Delta t$ , получим

$$\omega(t) = \alpha(t) + \int_c^t \omega(\tau) \alpha(t-\tau) d\tau \quad (I.20)$$

Средняя частота отказов может быть выражена через вероятность безотказной работы. Учитывая, что

$$\alpha(t) = -P'(t), \quad \alpha(t-\tau) = -P'(t-\tau)$$

и подставив эти выражения в (I.20), получим

$$\omega(t) = -P'(t) - \int_c^t \omega(\tau) P'(\tau) d\tau \quad (I.21)$$

В этом уравнении производная от вероятности безотказной работы берется по  $(t-\tau)$ . Решить аналитически уравнение (I.21) затруднительно, так как плотность распределения случайной величины часто имеет сложный вид, поэтому решают его приближенно на ЭВМ. Уравнение (I.21) носит название уравнения Вольтерра второго рода с разностным ядром. Это уравнение может быть записано в операторной форме, учитывая, что интеграл функций  $\omega(\tau)$  и  $P'(\tau)$  есть свертка этих функций, т.е.

$$\int_c^t \omega(\tau) \alpha(t-\tau) d\tau \dots \omega(s) \alpha(s). \quad (I.22)$$

Тогда уравнение (I.21) примет вид

$$\omega(s) = \alpha(s) + \omega(s) \cdot \alpha(s), \quad \text{т.е.} \quad \omega(s) = \frac{\alpha(s)}{1 - \alpha(s)}. \quad (I.23)$$

Операторные представления уравнения Вольтерра позволяют во многих случаях найти его решение в конечном виде.

Средняя частота отказов обладает следующими важными свойствами:

- средняя частота отказов больше частоты отказов, что следует из уравнения (I.21);

- независимо от вида функции  $\alpha(t)$  при  $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t)$  средняя частота отказов стремится к постоянной величине.

Средняя частота отказов достаточно полно оценивает свойства аппаратуры, работающей в режиме смены элементов. Такие системы после отказов ремонтируются и вновь эксплуатируются. Поэтому характеристика  $\omega(t)$  очень удобна для ремонтных предприятий, так как позволяет правильно спланировать частоту профилактических мероприятий, структуру ремонтных организаций, необходимое количество и номенклатуру запасных элементов.

Интенсивность отказов - отношение числа отказавших образцов аппаратуры в единицу времени к среднему числу образцов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие образцы не восстанавливаются и не заменяются исправными. Иначе эта характеристика может называться либо опасностью отказов, либо почтовой характеристикой, либо лямбда-характеристикой.

$$\bar{\lambda} = \frac{n(t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \quad (I.24)$$

где  $n(t)$  - число отказавших образцов за интервал  $\Delta t$ ;

$N_{cp}$  - среднее число исправно работающих образцов в интервале  $\Delta t$ ;

$N_i$  - среднее число исправно работающих образцов в начале интервала;

$N_{i+1}$  - среднее число исправно работающих образцов в конце интервала.

Типичная кривая интенсивности отказов показана на рис.I.3.

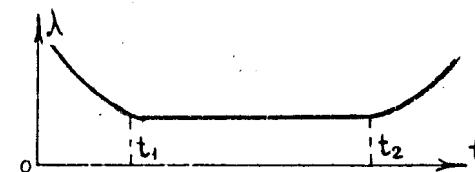


Рис.I.3

Эта кривая, также как и  $\lambda(t)$ , имеет 3 характерных участка:  
 1. Участок приработки  $0 \dots t_1$ ; 2. Участок нормальной работы  $t_1 \dots t_2$ ; 3. Участок старения  $t > t_2$ . Участок  $\lambda = \text{const}$  объясняется отсутствием старения элементов на участке нормальной работы.

Выражение (I.24) является статистическим определением интенсивности отказов. Для вероятностного представления этой характеристики установим связь между  $\lambda(t)$ ,  $P(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$ . Подставим в (I.24) выражения (I.10) и (I.11).

$$\lambda(t) = \frac{N_c [P(t) - P(t + \Delta t)]}{N_c \Delta t} = \frac{[P(t + \Delta t) - P(t)]}{P(t) \Delta t}. \quad (I.25)$$

Учитывая (I.4) и то, что  $N_c = N_0 - n(t)$ , имеем

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[P(t + \Delta t) - P(t)]}{P(t) \Delta t} = - \frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (I.26)$$

После интегрирования

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \ln P(t), \\ P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (I.27)$$

или

$$\lambda(t) = \frac{\alpha(t)}{P(t)}, \quad \bar{\lambda}(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (I.28)$$

Выражения (I.27) и (I.28) устанавливают зависимости между характеристиками  $\bar{\lambda}(t)$ ,  $P(t)$  и  $\lambda(t)$ , а выражение (I.28) есть вероятностное определение характеристики  $\lambda(t)$ .

Средним временем безотказной работы называется математическое ожидание времени безотказной работы

$$T = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty t \bar{\lambda}(t) dt. \quad (I.29)$$

Выражение (I.29) является вероятностным. По статистическим данным время  $\bar{T}$  определяется по выражению

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} t_i}{N_c},$$

где  $N_c$  – число образцов, участвующих в испытании;  
 $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го образца.

При большом значении  $N_c$  эксперимент может усложниться, так как нужно знать моменты отказов всех образцов аппаратуры, поэтому можно пользоваться другим выражением:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} t_i \bar{t}_i}{N_c}, \quad (I.30)$$

где  $t_k$  – время, в течение которого отказали все  $N_c$  образцов;

$\Delta t$  – выбранная величина интервала времени;

$n_i$  – число образцов, отказавших в  $i$ -м интервале;  
 $\bar{t}_i = 0.5(t_{i-1} + t_i)$  – среднее время  $i$ -го интервала (здесь  $t_{i-1}$  – время в начале интервала;  $t_i$  – время в конце интервала).

Найдем аналитическую связь между  $T$  и другими характеристиками. Подставим в (I.29) выражение (I.5)

$$T = - \int_0^\infty t P'(t) dt = - t P(t) \Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t) dt$$

(т.е. выполнили интегрирование по частям),

$$T = \int_0^\infty P(t) dt. \quad (I.31)$$

После подстановки в (I.31) выражения (I.27)

$$T = \int_0^\infty e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt, \quad (I.32)$$

т.е. при известном  $\lambda(t)$  легко вычисляется параметр надежности  $T$ .

Удобство характеристики  $T$  в том, что она просто вычисляется по экспериментальным данным при отказах и является наиболее наглядной количественной характеристикой. Недостаток этой характеристики в том, что она не позволяет оценить надежность аппарата, реальное время работы которой во много раз меньше времени безотказной работы. Кроме того,  $T$  характеризует надежность элементов только разового пользования. Величиной  $T$  можно характеризовать надежность и сложных систем, но лишь до первого отказа. У изделий, работающих в режиме смены отказавших элементов, среднее время безотказной работы может существенно отличаться от среднего времени между 1 и 2-м, 2 и 3-м и так далее отказами. Поэтому на-

дежность аппаратуры длительного пользования оценивают наработкой на отказ, т.е. средним значением времени между соседними отказами, при условии восстановления каждого отказавшего элемента. По статистическим данным эта характеристика

$$\bar{t}_{cp} = \frac{\sum t_i}{n}, \quad (I.33)$$

где  $n$  - число отказов аппаратуры за время  $t$ ;

$t_i$  - время исправной работы аппаратуры между ( $i-1$ ) и  $i$  отказами.

Формулой (I.33) удобно пользоваться, если  $\bar{t}_{cp}$  определяется по данным об отказах лишь одного образца. Если испытания проводятся с несколькими образцами, то

$$\bar{t}_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{t}_{cp,j}}{N_0}, \quad (I.34)$$

где  $\bar{t}_{cp,j}$  - среднее время между отказами  $j$ -го образца, вычисленное по (I.33);

$N_0$  - число испытуемых образцов.

Таким образом,  $P(t), Q(t), \lambda(t), T$  являются основными функциональными характеристиками надежности со своими достоинствами и недостатками. Ни одна из этих характеристик не является исчерпывающей, только их совокупность может характеризовать надежность исследуемого устройства.

Функциональные характеристики позволяют оценить надежность простых элементов и сложных систем в период эксплуатации и хранения. Но они не учитывают всех составляющих цикла эксплуатации: профилактического ремонта, готовности действия аппаратурой и т.д. Поэтому для учета всех составляющих введены коэффициенты надежности, которые можно разделить на 4 группы:

1. Коэффициенты готовности, вынужденногоостояния и профилактики учитывают соотношение между временем работы и простоя аппаратуры.

2. Частота профилактики характеризует частоту профилактических мероприятий.

3. Коэффициенты отказов и расхода элементов характеризуют влияние надежности установленных элементов на надежность всей аппаратуры.

4. Коэффициенты значимости и стоимости эксплуатации.

Коэффициентом готовности изделия называется отношение времени безотказной работы к сумме времени безотказной работы и восстановле-

ния аппаратуры, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{ti}}, \quad (I.35)$$

где  $t_{pi}$  - время безотказной работы;

$t_{ti}$  - время восстановления, т.е. время, затраченное на профилактику и ремонт аппаратурой (в  $t_{ti}$  не входит время хранения и подготовки изделия к работе).

Для сложных систем

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_t}. \quad (I.36)$$

Равные значения  $K_r$  не означают равноценности аппаратур в смысле надежности. Пусть 1-я система имеет большое значение  $\omega$  (малонадежная), но малое  $t_t$  (легко эксплуатируемая), а 2-я система наоборот. Тогда значения  $K_r$  могут быть одинаковыми, но оценка коэффициента должна быть индивидуальной, т.е. если требуется непрерывная работа системы, то 1-я система эту задачу решить не может, а 2-я система может, но зато аппаратура 1 может обслуживаться менее квалифицированными кадрами и иметь большее число запасных деталей.

Коэффициент вынужденногоостояния - это отношение времени восстановления к сумме времени восстановления и безотказной работы аппаратуры, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_n = \frac{t_t}{t_p + t_t} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{ti}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{ti}}, \quad (I.37)$$

или  $K_n = 1 - K_r$ .

Коэффициент профилактики - отношение времени восстановления ко времени безотказной работы аппаратуры, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_{op} = \frac{t_t}{t_p} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{ti}}{\sum_{i=1}^n t_{pi}}, \quad (I.38)$$

где  $t_p$  - время непрерывной работы аппаратуры;

$t_i$  - время восстановления аппаратуры.

Частота профилактики - это отношение числа осмотров и ремонтов аппаратуры к сумме времени безотказной работы и времени восстановления, взятых за определенный календарный срок

$$K_\omega = \frac{N_p + N_{os}}{t_p + t_i} = \frac{N_p + N_{os}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{ii}}, \quad (I.39)$$

где  $N_p$  - число ремонтов аппаратуры;

$N_{os}$  - число профилактических осмотров.

$$K_\omega = K_r \frac{1 + N_p/N_{os}}{t_{cp}}. \quad (I.40)$$

С одной стороны, чем надежнее аппаратура, тем больше  $t_{cp}$  и меньше  $K_\omega$ , но с другой стороны, уменьшение  $N_{os}$  может привести к уменьшению среднего времени между соседними отказами.

Коэффициент отказов - это отношение числа отказов аппаратуре из-за отказов элементов данного типа к общему числу отказов аппаратуре, взятых за определенный календарный срок.

$$K_o = \frac{N_i}{N}, \quad (I.41)$$

где  $N_i$  - число отказов из-за  $i$ -го элемента;

$N$  - общее число отказов.

При большом числе образцов

$$N_i = \sum_{j=1}^{N_o} n_{ij}, \quad N = \sum_{j=1}^{N_o} n_j,$$

где  $N_o$  - число испытуемых образцов;

$n_{ij}$  - число отказов в  $j$ -м образце из-за  $i$ -го элемента;

$n_j$  - общее число отказов  $j$ -го образца.

Коэффициент отказов характеризует элементную структуру, как аппаратуры многократного пользования, работающей в режиме смены элементов, так и аппаратуры разового пользования.

### I.5. Основные законы распределения времени безотказной работы

Время между отказами является случайной величиной, которая может быть полностью определена, если известна ее функция распределения либо плотность распределения, т.е. производная от функции рас-

пределения. Плотность распределения времени между отказами представляет собой непрерывную функцию времени. Случайные функции в зависимости от их физического смысла могут иметь различные законы распределения. На практике время безотказной работы простых и сложных систем подчиняется определенным законам. В зависимости от физической сущности объекта, условий его работы и эксплуатации применяют различные математические модели распределений, но наиболее распространенными являются однопараметрические распределения (например экспоненциальный закон распределения, распределение по закону Пуассона) и двухпараметрические (нормальный закон, распределение по закону Рэлея и Вейбулла).

Для большинства объектов после периода приработки удовлетворительную точность описания функции распределения дает экспоненциальный закон. При таком законе распределения интенсивность отказов  $\lambda = \text{const}$ , вероятность безотказной работы

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}, \\ \text{вероятность отказа } Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}, \\ \text{частота отказов } \lambda(t) &= \lambda e^{-\lambda t}, \\ \text{среднее время безотказной работы } T &= \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \lambda^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (I.42)$$

Приведенный закон распределения характерен для аппаратуры, которая в процессе эксплуатации не стареет, т.е. для любой аппаратуры в период ее нормальной работы.

Характеристики экспоненциального закона (I.42) верны как для аппаратуры разового использования, так и для аппаратуры многократного применения, работающей в режиме смены отказавших элементов.

Если в выражении (I.42) считать, что изделие при известном  $\lambda(t)$  отработало время, которое соответствует  $\lambda = T^{-1}$ , то

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t} = 0.37,$$

т.е. среднее время безотказной работы - это время, в течение которого вероятность безотказной работы уменьшается в  $e$  раз.

При оценке надежности целесообразно вычислить не только математическое ожидание  $t_{cp}$  (что будет равно  $T$ ), но и ее дисперсию

$$T(t) = \int (t - T)^2 P'(t) dt = \lambda \int (t - T)^2 e^{-\lambda t} dt = T^2; \sigma(t) = \sqrt{T(t)} = T.$$

Таким образом, при экспоненциальном законе распределения среднеквадратичное отклонение времени возникновения отказов равно среднему времени безотказной работы, т.е. при экспоненциальном законе распределения среднее время безотказной работы является достаточно полной характеристикой надежности. Это свойство позволяет на практике проверить истинность гипотезы об экспоненциальном распределении. Для этого из статистических данных берут  $T$  и  $\sigma(t)$ , и если они совпадают, то гипотеза принята правильно.

При экспоненциальном законе коэффициент готовности

$$\left. \begin{aligned} K_g &= \frac{1}{1 + \lambda_c \bar{t}_b}, \\ \text{коэффициент вынужденного простоя} \\ K_p &= \frac{\lambda_c \bar{t}_b}{1 + \lambda_c \bar{t}_b}, \\ \text{коэффициент профилактики} \\ K_{\omega} &= \lambda_c \bar{t}_b, \\ \text{частота профилактики} \\ K_o &= N_i \frac{\lambda_i}{\lambda_c}, \end{aligned} \right\} \quad (I.43)$$

где  $\lambda_c$  - интенсивность отказов системы;

$\lambda_i$  - интенсивность отказов элементов системы.

График изменения показателей надежности при экспоненциальном законе распределения показан на рис. I.4.

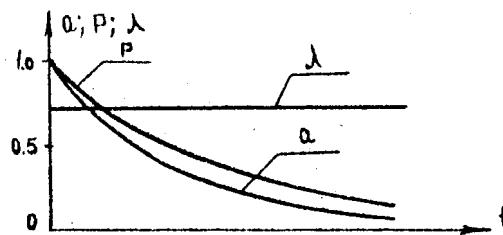


Рис. I.4

Если поток отказов объекта не удовлетворяет условиям простейшего потока, то следует применить другие законы распределения.

Простейшим потоком отказов называют поток, который одновременно удовлетворяет условиям стационарности, отсутствия последействия и ординарности.

Стационарность случайного процесса времени возникновения отказа означает, что на любом промежутке времени  $\Delta t$  вероятность возникновения  $N$  отказов зависит только от величины  $\Delta t$  и не изменяется при сдвиге  $\Delta t$  по оси времени.

Отсутствие последействия означает, что вероятность наступления  $N$  отказов в течение времени  $\Delta t$  не зависит от того, сколько было отказов и как они распределялись во времени до наблюдавшихся отказов. Это означает, что корреляционные связи между временами возникновения отказов отдельных элементов отсутствуют, т.е. отказ любого элемента системы не приводит к изменению надежности остальных элементов.

Ординарность потока отказов означает невозможность появления в один и тот же момент времени более одного отказа.

В действительности предположение о допущении простейшего потока далеко не всегда бывает справедливым: существует факт приработки (участок  $0 \dots t_1$  на рис. I.3) и факт старения элементов (участок  $t > t_2$  на рис. I.3). Отдельные узлы сложной системы работают в разное время и нужно обязательно учитывать факт сдвига во времени работы этих узлов при оценке характеристик надежности.

Существуют системы, от которых требуются высокие количественные оценки надежности только в течение малого времени. В этом случае, если отказаться от условия стационарности потока и считать, что в процессе эксплуатации элементы аппаратуры интенсивно изнашиваются по линейному закону (т.е.  $\lambda(t)$  есть линейная функция), то время возникновения отказов распределится по закону Рэлея. График изменения показателей надежности при распределении времени безотказной работы по закону Рэлея показан на рис. I.5.

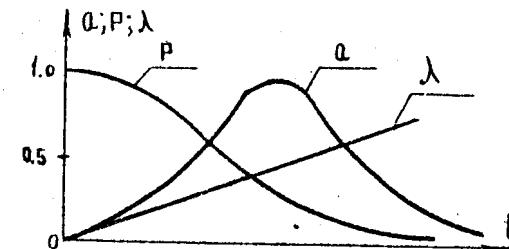


Рис. I.5

Основные характеристики этого распределения:

$$\left. \begin{aligned} \Omega(t) &= \frac{t \sigma^{-2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}}{1}, \quad P(t) = 1 - \int_0^t \Omega(t) dt = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \\ \lambda(t) &= t \sigma^{-2}, \quad T = \int_0^\infty P(t) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma, \end{aligned} \right\} \quad (I.44)$$

где  $\sigma$  — параметр распределения Рэлея.

С течением времени вероятность безотказной работы уменьшается значительно интенсивнее, чем при экспоненциальном распределении. В области малых значений  $t$ , где  $\lambda(t)$  незначительна,  $P(t)$  изменяется медленнее, чем при экспоненциальном законе распределения. Это означает, что сложные автоматические системы, предназначенные для малого времени работы, целесообразно строить на элементах, подчиняющихся распределению времени между отказами по закону Рэлея.

Если поток отказов не является стационарным и имеет место сначала весьма незначительное, а затем интенсивное старение элементов, то применим нормальный закон распределения времени безотказной работы. Имея в виду, что  $t > 0$ , применяют усеченный нормальный закон. Характеристики нормального закона распределения:

$$\Omega(t) = C e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}, \quad (I.45)$$

где  $T_1$ ,  $\sigma^2$  — среднее значение и дисперсия времени между отказами в нормальном законе;

$C$  — постоянная усеченного нормального распределения, выбираемая из условия

$$\int_0^\infty \Omega(t) dt = 1, \text{ т.е. } C = \frac{\sqrt{2/\pi}}{\sigma [1 + \Phi(T_1/\sigma\sqrt{2})]}$$

(здесь  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$  — интеграл вероятности (взятый из таблицы справочника)).

Тогда

$$P(t) = 1 - C \sigma \sqrt{2\pi} \int_0^t f(t) dt,$$

где  $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}$  — плотность нормального распределения времени между отказами.

Для нормального закона вероятность попадания случайной величины  $X$  на участок  $\alpha$ ,  $\beta$  выражается формулой

$$P(\alpha \leq X \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx = \frac{1}{2} [\Phi(\frac{\beta - \mu}{\sigma\sqrt{2}}) - \Phi(\frac{\alpha - \mu}{\sigma\sqrt{2}})],$$

где  $\mu$ ,  $\sigma$  — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины.

Тогда для нашего случая  $\int_t^T f(t) dt = \frac{1}{2} [\Phi(\frac{T-T_1}{\sigma\sqrt{2}}) + \Phi(\frac{T_1}{\sigma\sqrt{2}})]$ ,

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= \frac{1 - \Phi(\frac{t-T_1}{\sigma\sqrt{2}})}{1 + \Phi(\frac{T_1}{\sigma\sqrt{2}})}, \\ T &= T_1 + C \sigma^2 e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}, \\ \lambda(t) &= \frac{\Omega(t)}{P(t)} = \frac{\sqrt{2/\pi} e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma [1 + \Phi(\frac{t-T_1}{\sigma\sqrt{2}})]}. \end{aligned} \right\} \quad (I.46)$$

Характеристики при нормальном законе распределения показаны на рис. I.6.

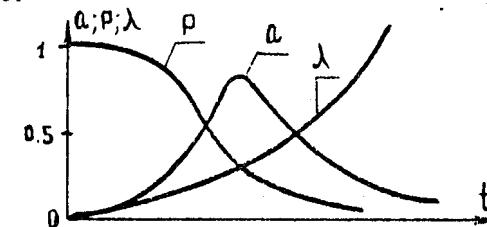


Рис. I.6

В области высоких значений  $P$  средняя частота отказов  $\lambda$  практически совпадает с  $\lambda$ . Усеченное нормальное распределение наблюдается при постепенных отказах в сложных системах с учетом превышения параметрами элементов допустимых пределов.

Для анализа надежности в период приработки как для механических изделий (например для шариковых подшипников), так и для некоторых электронных устройств часто используется распределение по закону Вейбулла. Оно используется также при ускоренных испытаниях элементов либо при форсированных режимах их работы. Частота отказов для этого распределения задается выражением

$$\lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}, \quad (I.47)$$

где  $\lambda_0$  и  $k$  - параметры распределения, причем  $\lambda_0$  определяет масштаб, а  $k$  - асимметрию и эксцесс распределения.

Основные функциональные характеристики для распределения по закону Вейбулла:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= 1 - \int_0^t \lambda(t) dt = e^{-\lambda_0 t^k}, \quad \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1}, \\ T &= \int_0^\infty e^{-\lambda_0 t^k} dt = \frac{\Gamma(1/k + 1)}{\lambda_0^{1/k}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

Графики изменения показателей надежности  $\hat{u}(t)$ ,  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$  приведены на рис. I.7а, б, в соответственно.

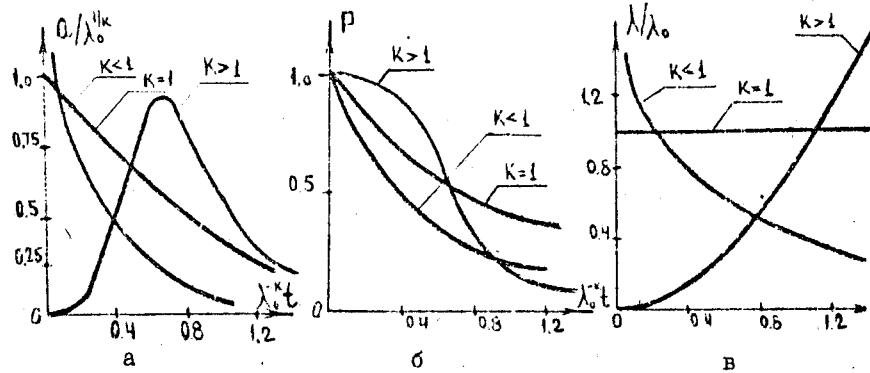


Рис. I.7

При  $k = 1$  распределение по закону Вейбулла превращается в экспоненциальное. При  $k > 1$  интенсивность отказов начинается с 0 (как при нормальном распределении), при  $k < 1$   $\lambda$  начинается с  $\infty$ , а при больших значениях  $t$   $\lambda \rightarrow 0$  (характерно для периода приработки). Интеграл Вольтерра для определения  $\hat{u}$  и коэффициентов надежности в этом распределении подсчитать не удается; эти характеристики можно вычислить на ЦВМ.

Конкретность применения того или иного вида распределения определяется на основании статистического материала и опытной эксплуатации отдельных деталей, узлов и изделий в целом.

## 2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОСНОВНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

### 2.1. Общие теоретические сведения

При анализе надежности систем различают три способа расчета: прикидочный, ориентировочный и окончательный. Первый способ расчета практикуется на этапе эскизного проектирования для проверки технической возможности обеспечения требуемой надежности. Ориентировочный расчет делается на этапе эскизного проектирования, когда уже составлена и отработана принципиальная электрическая схема системы. Окончательный расчет производится на этапе технического проектирования, когда произведены испытания готовых опытных образцов и известны режимы работы всех узлов и элементов. При окончательном расчете составляют структурную схему надежности, которая при основном соединении элементов практически будет совпадать с функциональной. Элементы системы надежности находятся в основном соединении, если выход из строя любого из них приводит к отказу всей системы. В противном случае имеет место резервное соединение элементов системы. Для каждого из элементов системы при окончательном расчете надежности определяются режимы и условия его работы и по соответствующим таблицам [5] устанавливают поправочные коэффициенты  $K_i$ , которые учитывают влияние климатических и режимных условий работы на характеристики надежности системы.

Рассчитать надежность системы - значит определить количественные оценки ее функциональных характеристик по известным характеристикам надежности элементов, из которых состоит система. Существует большое число методов расчета надежности, выбор которых определяется законом распределения времени возникновения отказов. В свою очередь, вид закона распределения зависит от способа соединения элементов. Поэтому все методы расчета можно разбить на две группы: метод расчета элементов с основным соединением и метод расчета элементов с резервным соединением. По виду отказов методы расчета подразделяются на метод с внезапным отказом и постоянным отказом.

### 2.2. Расчет надежности системы при внезапном отказе элементов

Вероятность безотказной работы  $P_c$  сколь угодно сложной системы равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_N = \prod_{i=1}^N P_i, \quad (2.1)$$

где  $N$  - число элементов.

Если поток отказов стационарен, тогда

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t} = e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (2.2)$$

Остальные параметры определяются элементарно, т.е. интенсивность отказов, среднее время безотказной работы и частота отказов соответственно:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad T_c = \lambda_c^{-1}, \quad Q_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (2.3)$$

Для случая  $\lambda = \text{const}$  средняя частота отказов и среднее время между соседними отказами совпадают соответственно с интенсивностью отказов и средним временем безотказной работы.

Описанный метод расчета может быть применен лишь при окончательном расчете надежности системы, когда экспериментально получены режимы работы всех ее элементов, что возможно только при окончательном построении опытного образца.

При ориентировочном расчете надежности изделия, когда нет еще опытного образца, делается упрощающее предположение: все однотипные элементы независимо от режимов их работы имеют одинаковую интенсивность отказов, равную среднестатистическому ее значению. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} P_c(t) &= e^{-t \sum_{i=1}^I (\lambda_i N_i)}, \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^I (N_i \lambda_i), \\ T_c(t) &= \sum_{i=1}^I (N_i \lambda_i)^{-1}, \quad Q_c(t) = \sum_{i=1}^I N_i \lambda_i \cdot P_c(t), \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где  $N_i$ ,  $\lambda_i$  - число элементов и среднестатистическая интенсивность отказов элементов  $i$ -го типа;

$I$  - число типов элементов.

Эта формула справедлива для случая одновременной работы всех элементов системы.

Рассмотрим пример расчета. Вычислим количественные оценки характеристик надежности усилителя электропривода, если известна его электрическая схема. Режимы работы элементов не заданы; все однотипные элементы равнодежны.

Делаем ориентировочный расчет. Формулировка отказа: отказ мгновенный, обусловленный обрывом или коротким замыканием любого из элементов. Соединение элементов - основное. Интервал работы всех элементов одинаков.

Составляется таблица 2.1 расчета надежности, в которую входят следующие данные: количество элементов  $N_i$ , интенсивность отказов элементов\*  $\lambda_i$  и произведение  $N_i \lambda_i$ .

Таблица 2.1

Элементы	$N_i$	$\lambda_i, \text{ч}^{-1}$	$N_i \lambda_i, \text{ч}^{-1}$
Транзисторы	15	$(0,08-0,11) \cdot 10^{-3}$	$(1,2-1,65) \cdot 10^{-3}$
Диоды	5	$(0,08-0,11) \cdot 10^{-3}$	$(0,4-1,55) \cdot 10^{-3}$
Бесконтактный ключ	1	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$
Сопротивления:			
угольные	80	$0,0035 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$
проводочные	4	$0,0125 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
Конденсаторы:			
керамические	27	$0,0023 \cdot 10^{-3}$	$0,062 \cdot 10^{-3}$
бумажные	25	$0,0016 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$
перемонной емкости	4	$0,0166 \cdot 10^{-3}$	$0,075 \cdot 10^{-3}$
электролитические	8	$0,06 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$
Катушки индуктивности	51	$(0,001-0,0015) \cdot 10^{-3}$	$(0,051-0,076) \cdot 10^{-3}$
Трансформаторы	6	$(0,004-0,006) \cdot 10^{-3}$	$(0,024-0,036) \cdot 10^{-3}$
Дроссели	6	$(0,001-0,0015) \cdot 10^{-3}$	$(0,006-0,009) \cdot 10^{-3}$

Если целесообразно найти значение  $\lambda$  для группы элементов, то его определяют как среднее значение величины  $\lambda$  всех этих элементов

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{i1} + \lambda_{i2} + \dots + \lambda_{in}}{n_i}.$$

Далее следует вычисление функциональных характеристик

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^I N_i \lambda_i = 0,0031 \dots 0,00375 \text{ ч}^{-1},$$

$$P_c(t) = e^{-(0,0031 \dots 0,00375)t},$$

$$T_c = 323 \dots 267 \text{ ч}, \quad Q_c = 0,0031 e^{-0,0031t} \dots 0,00375 e^{-0,00375t}.$$

\* Значения интенсивности отказов элементов даны в приложении.

Для быстрого ориентировочного расчета составлена специальная номограмма, определяющая зависимость  $P_c(t)$  и  $T_c$  от числа элементов и их интенсивности отказов. Номограмма отражает формулу

$$P(t) = e^{-N\lambda_i t} \text{ за } t = 1 \text{ ч и } T = (N\lambda_i)^{-1}$$

Номограмма содержит 4 шкалы (рис.2.1; все шкалы логарифмические):

- левая шкала - среднее время безотказной работы  $T$ ;
- правая шкала - вероятность безотказной работы  $P(t)$  в конце первого часа;
- верхняя шкала - количество элементов системы  $N$ ;
- диагональ - шкала интенсивности  $\lambda_i$ .

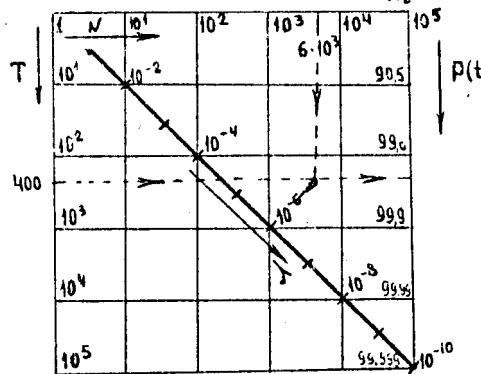


Рис.2.1

Зная любые две величины, по номограмме можно определить остальные две. Пусть дано, что среднее время безотказной работы системы должно быть не менее 400 ч. Требуется установить, элементы какого уровня надежности должны быть использованы и какова будет вероятность безотказной работы за 10 ч непрерывной работы.

Пусть число элементов равно 6000. Из точек  $N = 6000$  и  $T = 400$  восстановим перпендикуляры до их пересечения и находим  $\lambda_c = 10^{-6}$  и  $P(1) = 99,5$ . За 10 ч

$$P(10) = e^{-t/T} = e^{-\frac{10}{400}} = 0,975 = 97,5\%.$$

Как уже говорилось ранее, необходимо при окончательном расчете учитывать режимы работы изделий. С учетом режимов нагрузки элементов

$$\lambda_p = \lambda_n + \prod_{i=1}^n \alpha_i, \quad (2.5)$$

где  $\lambda_p$  - интенсивность отказа элементов, соответствующая режиму эксплуатации элементов в системе (рабочему состоянию);

$\lambda_n$  - интенсивность отказов приnomинальной нагрузке в нормальных условиях;

$\alpha_i$  - коэффициент, учитывающий электрические и тепловые режимы работы, а также меры по защите деталей от тяжелых режимов.

Например, для реле, работающего в режиме большого числа переключений (более 12 в час),  $\lambda$  вычисляется по формуле

$$\lambda_p = \lambda_n + q \lambda_n, \quad (2.6)$$

где  $q$  - среднее число переключений в час;

$\lambda_n$  - интенсивность отказов устройства за одно переключение.

Существует номограмма, по которой можно определить вероятность числа отказов в системе за заданный промежуток времени при заданной вероятности безотказной работы (рис.2.2).

По оси ординат отложены значения вероятности безотказной работы, а по оси абсцисс - отношения  $t/\tau$ , где  $t$  - реальное время, а  $\tau$  - среднее время безотказной работы системы.

Рассмотрим пример расчета. Система автоматизации характеризуется

$$P(t) = 0,818 \text{ за } t = 720 \text{ ч.}$$

Определить суммарное количество отказов за 720 ч.

$$P(t) = e^{-t/\tau} = 0,818.$$

$$\frac{t}{\tau} = -\ln P(t) = 0,2.$$

От точки  $t/\tau = 0,2$

проводим вертикаль до пересечения с  $Q = 1 - 0,818 =$

$= 0,182$  (на графике 18,2 %) и считаем число отказов  $M = 3+2+1 = 6$ .

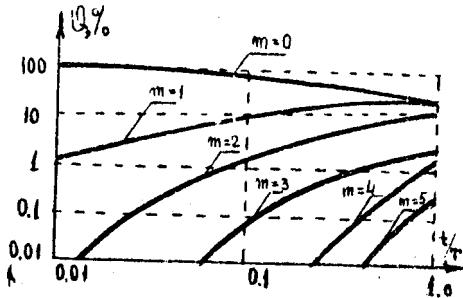


Рис.2.2

### 2.3. Определение коэффициентов надежности системы

Для определения коэффициентов надежности системы необходимо сгруппировать все элементы системы по их типам и для каждой группы вычислить следующие параметры:

1. Время восстановления  $\bar{T}_{ti}$ .

2. Суммарную интенсивность отказов каждой группы элементов

$$\lambda_{cp} = N \lambda_{cp}$$

3. Суммарную интенсивность отказов системы

$$\lambda_{cst} = \sum_i^n \lambda_{cp,i}, \text{ где } n - \text{ количество групп элементов.}$$

4. Вероятность того, что возникшая неисправность относится именно к данной группе,

$$P_i = \lambda_{cp,i} / \lambda_{cst}$$

5. Диапазон  $P_i \bar{T}_{ti}$ .

6. Среднее время отыскания и устранения одной неисправности системы

$$\bar{T}_t = \sum_i^n P_i \bar{T}_{ti}$$

7. Коэффициент готовности системы.

Все сведения сводятся в соответствующую таблицу (см.табл.2.2).

В качестве примера рассчитаем  $\lambda_{cst}$  и коэффициент готовности электронного сигнализатора уровня ЭСУ-1. Внесем в табл.2.2 значения  $\lambda_i$  и  $\bar{T}_{ti}$ .

Таблица 2.2

Группа элементов	Количество элементов в группе	Средняя интенсивность отказов элементов, $\lambda_{cp,i} \cdot 10^{-6}$	Среднее время отыскания и устранения 1-го отказа, $\bar{T}_{ti}$	$N \lambda_{cp} \cdot 10^6$	$P_i = \frac{\lambda_{cp,i}}{\lambda_{cst}}$	$P_i \bar{T}_{ti}$
Резисторы	6	3,5	1,4	21	0,086-0,077	0,12-0,1
Конденсаторы	5	5,15	2,0	25,75	0,106-0,094	0,212-0,188
Полупроводниковые диоды	4	15	0,7	60	0,246-0,219	0,172-0,154
Электровакумные приборы	1	100	1	100	0,41-0,366	0,41-0,366
Катушки индуктивности	1	7	2,5	7	0,03-0,026	0,075-0,064
Трансформаторы	1	5	1,8	5	0,022-0,018	0,037-0,033
Реле	1	18-50	1,4	18-50	0,082-0,183	0,115-0,256
Тумблеры	1	5	1,0	5	0,022-0,018	0,022-0,018

$$\text{По резисторам } \lambda_{cp} = \frac{20 + 0,2 \cdot 5}{6} \cdot 10^{-6} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

$$\text{По группе конденсаторов } \lambda_{cp} = 5,15 \cdot 10^{-6} \text{ и т.д.}$$

Для реле принято верхнее и нижнее значение диапазона интенсивности:  $(18-50) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

$$\text{По каждой группе элементов вычисляем } N \lambda_{cp} = 3,5 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ и т.д.}$$

Далее суммируем все значения  $N \lambda_{cp} \cdot 10^{-6}$  в графе таблицы и получаем

$$\lambda_{cst} = \sum_i^n N_i \lambda_{cp,i} = (245 \dots 273) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Для каждой группы элементов

$$P_i = \frac{\lambda_{cp,i}}{\lambda_{cst}} = \frac{21}{245 \dots 273} = 0,086 \dots 0,077.$$

$$\text{Вычисляем } P_i \bar{T}_{ti} = (0,086 \dots 0,074) \cdot 1,4 = (0,12 \dots 0,108); \\ \sum_i^n P_i \bar{T}_{ti} = 1,16 \dots 1,19 \text{ ч.}$$

По экспериментальным данным на холодильных установках для ЭСУ  $\bar{T}_t = 1,75 \dots 4,0$  ч.

Для крайних значений диапазона среднего времени отыскания и устранения одной неисправности системы определяем коэффициенты готовности.

$$K_{r1} = \frac{1}{1 + \lambda_{cst} \bar{T}_{t1}} = \frac{1}{1 + 245 \cdot 10^{-6} \cdot 1,16} = 0,999,$$

$$K_{r2} = \frac{1}{1 + \lambda_{cst} \bar{T}_{t2}} = \frac{1}{1 + 273 \cdot 10^{-6} \cdot 1,187} = 0,999,$$

где  $K_{r1}$ ,  $K_{r2}$  – коэффициенты для нижнего и верхнего диапазона интенсивности отказов реле.

### 2.4. Понятие о расчете надежности систем при постепенных отказах

Динамические свойства системы определяются ее параметрами (постоянными временем, коэффициентами усиления и т.д.), которые в свою очередь зависят от значений параметров элементов (сопротивлений, емкостей, индуктивностей и т.д.). При длительной эксплуатации элементы за счет старения изменяют свои параметры, что может привести к резкому ухудшению динамики автоматической системы и даже к потере устойчивости и первоначальной точности. Возникает задача

анализа надежности системы, причем под постепенным отказом понимаются события, после появления которых рабочие характеристики выходят за допустимые пределы. Рассчитать надежность в этом случае – значит найти вероятность того, что в течение времени  $t$  рабочие характеристики не выйдут за допустимые пределы, если известны законы распределения параметров элементов.

При расчете надежности систем с постепенными отказами делают допущения:

1. Выходные характеристики системы и параметры элементов являются случайными функциями времени с нормальным законом распределения в каждый момент времени.

2. Корреляционные связи между параметрами элементов отсутствуют.

3. Выходные характеристики зависят от параметров элементов.

4. Система считается отказавшей, если хотя бы одна из ее выходных характеристик вышла за допустимые пределы.

На основании допущений о нормальном законе распределения выходных характеристик системы частота отказов по любой из характеристик  $Y_i$  определяется выражением

$$\bar{U}(Y_i, t, \xi) = \frac{1}{\beta_{Y_i}(t, \xi)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Y_i - \bar{Y}_i(t, \xi)}{2\beta_{Y_i}^2(t, \xi)}\right), \quad (2.7)$$

где  $\bar{Y}_i(t, \xi)$  – математическое ожидание характеристики  $Y_i$  в момент времени  $t$  при условиях эксплуатации  $\xi$ ;

$\beta_{Y_i}^2(t, \xi)$  – дисперсия характеристики  $Y_i$  в момент  $t$  при условии  $\xi$ .

Вероятность того, что изменения  $Y_i$  системы в момент времени  $t$  при условиях  $\xi$  находятся в допустимых пределах

$$P[\underline{\delta} < Y_i < \bar{\beta}, t, \xi] = \frac{1}{2} \left[ \Phi\left(\frac{\bar{\beta} - \bar{Y}_i(t, \xi)}{\sqrt{2}\beta_{Y_i}(t, \xi)}\right) - \Phi\left(\frac{\underline{\delta} - \bar{Y}_i(t, \xi)}{\sqrt{2}\beta_{Y_i}(t, \xi)}\right) \right], \quad (2.8)$$

где  $\underline{\delta}$ ,  $\bar{\beta}$  – допустимые пределы изменений выходной характеристики.

При этом мы должны обязательно иметь систему уравнений, связывающую  $Y_i$  с ее параметрами

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Y_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{cases}$$

где  $x_i$  – параметр  $i$ -го элемента.

Для сложных систем аналитический расчет надежности практически невозможен, поэтому существуют другие методы расчета: матричный и спектральный, которые рассмотрены в специальной литературе [1], [2].

### 3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

#### 3.1. Понятие об избыточных системах

Для выполнения заданных функций автоматическая система должна иметь определенную структуру, которая определяет габариты, массу и стоимость системы. Для улучшения параметров надежности приходится либо упрощать структуру, либо применять специальные методы повышения надежности. Для повышения надежности нужно либо выбирать наиболее качественные элементы, обладающие высокой надежностью, либо облегчать режим работы этих элементов, либо вводить резервные узлы и детали. Все это приводит к увеличению стоимости, массы и габаритов системы, или, как принято говорить, к избыточности. Избыточность (но не резервирование) – это превышение массы, габаритов и стоимости системы по сравнению с минимально необходимыми для заданной структуры, связанное с обеспечением заданной надежности.

Наиболее распространенный путь повышения надежности – резервирование. Резервированием называется повышение надежности путем включения резервных элементов при разработке системы или в процессе ее эксплуатации. Основной параметр резервирования – это кратность – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых (основных). Резервирование может быть с зависимостью от: кратности – с целой и дробной кратностью; способа включения резерва – общим и раздельным (поелементным); метода включения резерва – с постоянно включенным резервом и с замещением при "холодном", "теплом" и "горячем" его состояния.

Резервирование с целой кратностью – это резервирование, при котором для нормальной работы резервированного соединения достаточно, чтобы исправным был хотя бы один элемент расчета

$$m = \frac{l-h}{h}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – кратность резерва;

$l$  – общее число элементов резервированного соединения;

$h$  – число элементов, необходимое для нормальной работы соединения.

Если число  $M$  получится дробным, то резервирование будет с дробной кратностью. Кратность резервирования нужно записывать в виде простой дроби без сокращения. Например,  $M = \frac{4}{2}$  – резервирование с дробной кратностью, причем для нормальной работы соединения необходимо не менее двух элементов.

Резервирование с дробной кратностью – это резервирование, при котором нормальная работа соединения возможна при условии наличия определенного числа элементов (например, резервирование параллельного соединения элементов). На рис.3.1 показаны схемы резервирования: а – общего постоянного; б – общего с замещением; в – раздельного постоянного; г – раздельного с замещением; д – со скользящим резервом.

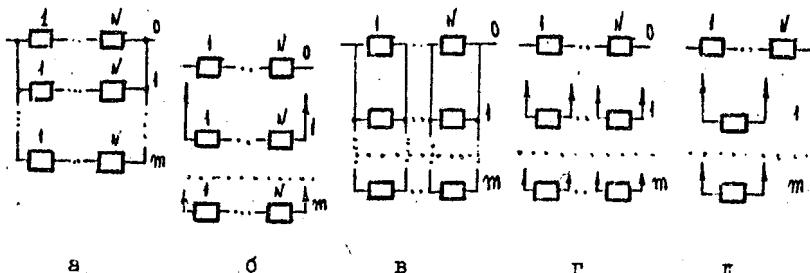


Рис.3.1

Если  $M = 2$ , то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, причем число резервных элементов равно двум, а общее число элементов соединения равно трем. Сокращение дроби  $M = \frac{4}{2}$  меняет смысл резервирования.

При резервировании со скользящим резервом любой из резервных элементов может замещать любой основной элемент.

Если типом отказа является обрыв или короткое замыкание, то ни параллельное, ни последовательное соединение повышения надежности не даст при одинаковой вероятности возникновения таких отказов у всех элементов. В этом случае приходится применять либо последовательно-параллельное резервирование, либо резервирование с дробной кратностью. Кроме того, нужно иметь в виду, что при раздельном резервировании необходимы надежные автоматы переключения, что может привести к усложнению схемы и раздельное резервирование может оказаться нецелесообразным. При постоянном резерве все элементы функционируют с момента включения устройства в работу, а при замене –

ном – элементы резерва подключаются в работу по мере выхода основных элементов из строя. Преимущество постоянного резерва – в его простоте (не нужно переключателей), а недостаток заключается в том, что при выходе хотя бы одного элемента из строя у резервных элементов меняются режимы работы.

При включении резерва по методу замещения резервные элементы до момента включения в работу, могут находиться в трех состояниях:

1) нагруженном ("горячем"), т.е. внешние условия резерва полностью совпадают с условиями, в которых находится рабочая аппаратура;

2) облегченном ("теплом"), т.е. внешние условия резерва до ввода его в работу – облегченные;

3) ненагруженном ("холодном"), т.е. резервные элементы до ввода в работу находятся в легких условиях и начинают расходовать свой ресурс только с момента включения их в работу.

Классификация способов резервирования представлена на рис.3.2.

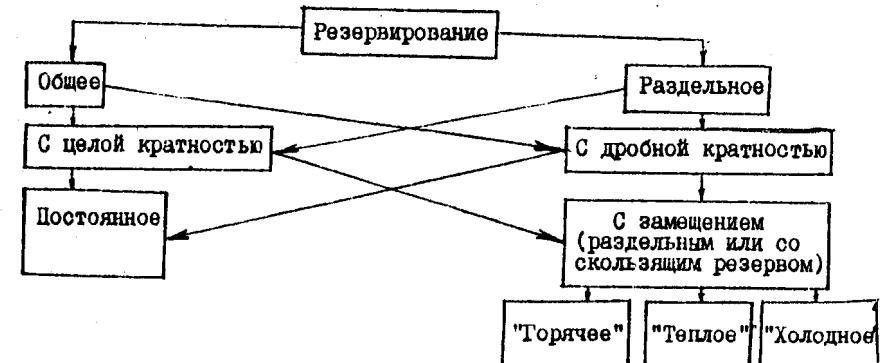


Рис.3.2

### 3.2. Основные функциональные характеристики надежности при постоянно включенном резерве

Для расчета систем с постоянно включенным резервом необходимо сделать следующие допущения:

1) отказы элементов резервированной системы удовлетворяют условиям простейшего потока случайных событий;

2) переключающие устройства являются идеальными, а их элементы равнонаадежны;

3) ремонт резервированной системы в процессе ее работы не производится, т.е. имеем дело с системой разового пользования.

Следует отметить, что эти допущения не соответствуют действительности (элементы стареют и изнашиваются, особенно при отказе резервируемых, а переключающие устройства не могут быть абсолютно надежными, но они значительно надежнее всей сложной системы).

Для любой из  $M+1$  систем, каждая из которых состоит из  $N$  элементов, можно записать

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (3.2)$$

где  $N$  - число элементов любой из  $M+1$  систем;

$P_i(t)$  - вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента в течение времени  $t$ .

По допущению о равнодежности элементов

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdots Q_m(t) = Q^{m+1}(t), \quad (3.3)$$

где  $Q_i$  - вероятность отказа любой из  $M+1$  систем.

Но  $P_c(t) = 1 - Q_c(t)$ , т.е.

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^{m+1} = 1 - [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]^{m+1}, \quad (3.4)$$

$$Q_c(t) = [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]^{m+1}. \quad (3.5)$$

На основании I-го допущения

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad \prod_{i=1}^N P_i(t) = e^{-\lambda_0 t},$$

где  $\lambda_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i$  - интенсивность отказов любой из  $M+1$  систем, т.е.

$$\left. \begin{aligned} P_c(t) &= 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}, \\ Q_c(t) &= (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Среднее время безотказной работы

$$T_c(t) = \int_t^\infty P_c(t) dt = \int_t^\infty [1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}] dt.$$

Обозначим  $1 - e^{-\lambda_0 t} = Z$ , тогда  $dt = \frac{dz}{\lambda_0(1-Z)}$ , так как  $dz = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} dt$ ,  $e^{-\lambda_0 t} = 1 - Z$ . Заменив переменную, имеем: при  $t \rightarrow 0$ ,  $Z \rightarrow 0$ , а при  $t \rightarrow \infty$ ,  $Z \rightarrow 1$ , т.е. меняются пределы интеграла. В итоге получим

$$T_c = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^1 \frac{1 - Z^{m+1}}{1 - Z} dz = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^1 (1 + Z + Z^2 + Z^3 + \dots + Z^m) dz =$$

$$\frac{1}{\lambda_0} \int_0^1 \sum_{i=1}^m Z^i dz = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^m \frac{1}{i+1} Z^{i+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^m \frac{1}{i+1}.$$

Итак,

$$T_c = \frac{1}{\lambda_0} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m+1} \right).$$

### 3.3. Основные выводы по резервированным системам

1. Вероятность безотказной работы резервированной системы всегда больше вероятности  $P(t)$  нерезервированной системы, причем чем выше кратность резервирования, тем больше  $P(t)$ .

2. Среднее время безотказной работы  $T_c$  системы растет очень медленно с увеличением кратности резервирования. Например, при  $M = 10$   $T_{cP}$  возрастает всего лишь втрое.

3. Частота отказов резервированной системы при любой кратности начинается с нуля, имеет максимум и стремится в область больших значений  $\lambda_0 t$  к  $Q$  нерезервированной системы. Максимум функции

$Q_c/\lambda_0 = f(\lambda_0 t)$  находится в точке  $\lambda_0 t = \ell m(m+1)$  и равен величине  $\left(\frac{m}{m+1}\right)^m$ ,

т.е. с ростом кратности резервирования он перемещается в область больших значений  $\lambda_0 t$  и уменьшается (рис.3.3).

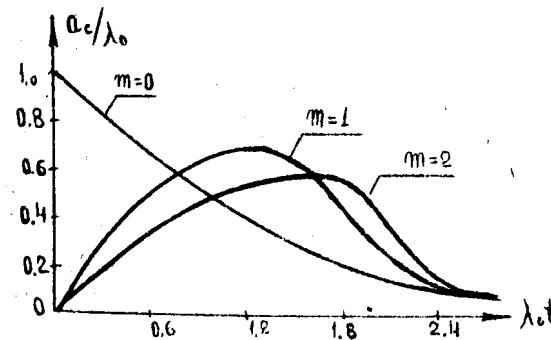


Рис.3.3.

4. Интенсивность отказов резервированной системы начинается с 0 и приближается в области больших значений  $\lambda_0 t$  к интенсивности отказов нерезервированной системы.

5. Эффективность резервирования состоит в том, что оно значительно улучшает основные количественные характеристики надежности в области малых значений  $\lambda_0 t$ .

Элементы	$\lambda \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$
Резисторы:	
непроволочные постоянные	0,4-0,5
непроволочные переменные	0,6-0,7
проводочные постоянные	1 - 1,5
проводочные переменные	2 - 2,5
Конденсаторы:	
керамические	1,4
бумажные	1,8
металлобумажные	2,0
электролитические	2,5
Диоды:	
германиевые	0,7
кремниевые	2,0
стабилитроны	5,0
Трансформаторы и моточные изделия:	
ЛАТРЫ и магнитные усилители	5
силовые трансформаторы	2
дроссели	1
Двигатели:	
асинхронные с полым ротором	6
синхронные	7
Термометры сопротивления:	
платиновые	19,4
медные	99,6
Температурное позиционное реле, дилатометрическое типа ТР-200	20,8
Электроконтактный термометр типа ЭКТ	330
Манометры дифференциальные типа ДМ	25
Манометры общего назначения типа ОБИ	247
Электроконтактные манометры типа ЭКМ-1	527
Реле давления типа РДА	115
Регуляторы уровня типа ЭСУ	633
Логометры типа ЛПР	230
Электронный потенциометр типа КС	710
Электронный мост типа КС	480
Вентиль запорный фланцевый типа СВФ	306

Элементы	$\lambda \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$
Клапаны электромагнитные типа КЭ-2	625
Сolenoidные вентили типа СВА, СВМ	25
Вибропреобразователи	500
Реле:	
герметизированные	0,1-0,2
типа РКН	10
типа РЭС-6	0,4
типа РПЗ-1,5	350-430
типа МКУ-48	50-130
Выключатели	0,1
Контакторы	1-5
Кнопки	0,2
Переключатели	5
Магнитные пускатели типа ПМЕ, ПМИ	2-14,5
Лампы сигнальные типа МИ	8-10

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем.- М.: Энергия, 1977.- 536 с.
2. Половко А.М. Основы теории надежности.- М.: Наука, 1964.- 446 с.
3. Липман А.А. Теория надежности в задачах и решениях.- М.: МЭИ, 1975.- 190 с.
4. Сборник задач по теории надежности/ Под ред. А.М.Половко и И.М.Маликова.- М.: Сов.радио, 1972.- 408 с.
5. Давидян Г.Г., Данченко М.Б., Гусева М.Е. Надежность техники как фактор эффективности производства/ ЦНИИТЭИ.- М.: Мясомолпром, 1986. - 62 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .	3
1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ . . . . .	3
1.1. Понятие о физической сущности надежности . . . . .	3
1.2. Основные понятия теории надежности . . . . .	4
1.3. Отказы и их классификация . . . . .	8
1.4. Функциональные характеристики надежности . . . . .	9
1.5. Основные законы распределения времени безотказной работы . . . . .	20
2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОСНОВНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ . . . . .	27
2.1. Общие теоретические сведения . . . . .	27
2.2. Расчет надежности системы при внезапном отказе элементов . . . . .	27
2.3. Определение коэффициентов надежности системы . . . . .	32
2.4. Понятие о расчете надежности систем при постепенных отказах . . . . .	33
3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ . . . . .	35
3.1. Понятие об избыточных системах . . . . .	35
3.2. Основные функциональные характеристики надежности при постоянно включенном резерве . . . . .	37
3.3. Основные выводы по резервированным системам . . . . .	39
Приложение . . . . .	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	43

Васильев Анатолий Иванович

## НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ АГРОПРОМА

Текст лекций

Второе издание, исправленное

Редакторы

Р.А. Сафарова, Н.М. Бахметьева

Корректоры

Н.И. Михайлова, Г.К. Панкова

Подписано в печать 14.11.2008. Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 2,79. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,81

Тираж 50 экз. Заказ № 459 С 229

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9  
ИИК СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9