Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ивановский государственный химико-технологический университет»

ДИАГНОСТИКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Методические указания к практическим занятиям по курсу
«Диагностика и надежность автоматизированных систем» для
студентов дневного и заочного обучения специальности 22.03.01.

Составитель: А.П.Самарский

Иваново 2006

Составитель А.П. Самарский
УДК 681.51 – 192 (075.8)

Диагностика и проведение испытаний автоматизированных систем. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Диагностика и надежность автоматизированных систем» для студентов дневного и заочного обучения специальности 22.03.01./ Сост. А.П.Самарский; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. Иваново, 2006. 32с.

В методических указаниях рассмотрены основные проблемы диагностики технических и программных средств автоматизированных систем, а также методы планирования испытаний автоматизированных систем на надежность. Представлены справочные данные для составления планов определительных и контрольных испытаний. Приведены задания для самостоятельного решения.

Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Рецензент
доктор технических наук А.Г.Липин (Ивановский государственный химико-технологический университет)

1. ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Техническая диагностика систем автоматизации направлена на исследование текущего состояния системы, разработку методов идентификации состояний системы и принципов построения систем диагностирования.

Технические средства, используемые в различных системах автоматизации весьма разнообразны, поэтому методы диагностики должны учитывать различия в формах проявления технического состояния систем автоматизации, целесообразность использования тех или иных методов определения работоспособности и поиска неисправностей в зависимости от особенностей технической реализации системы. Условия непрерывной эксплуатации систем автоматизации предполагают ориентацию средств диагностики не только на обнаружение и локализацию места возникновения отказа, но и на определение его характера и возможных последствий. Задачи технического диагностирования систем автоматизации непосредственно связаны с задачами теории управления и с методами, используемыми для их описания и анализа.

Техническое диагностирование предполагает определение технического состояния объекта диагностики с определенной точностью. Поскольку необходимо идентифицировать работоспособные и неработоспособные состояния объекта, возникает задача формирования математических моделей влияния отказов на работоспособность объекта диагностики по тем или иным критериям. Результат анализа таких моделей позволяет определить наиболее рациональный алгоритм поиска неисправностей и направление проектирования систем диагностики. Организация диагностирования приведена на схеме (рис.1.1).

В процессе функционирования система может переходить из одного состояния в другое. В связи с этим, при построении моделей функционирования системы наиболее существенным является определение оператора перехода системы в те или иные состояния. Математическая формулировка оператора может быть различной, однако, любое состояние должно определяться этим оператором однозначно.

Переход системы из работоспособного состояния в неработоспособные происходит под влиянием различных отказов. При контроле работоспособности результат перехода системы в то или иное состояние всегда точно известен, хотя причины этого перехода могут оставаться неопределенными. В этом случае можно установить некоторую регулярную последовательность событий, которая с определенной достоверностью выявляет причину перехода.

Особенностью детерминированных моделей объектов диагностики является единственность траекторий, однозначно определяющих связь работоспособности объекта с характером возникающих неисправностей. Для случайных моделей оператор перехода учитывает вероятностные характеристики.

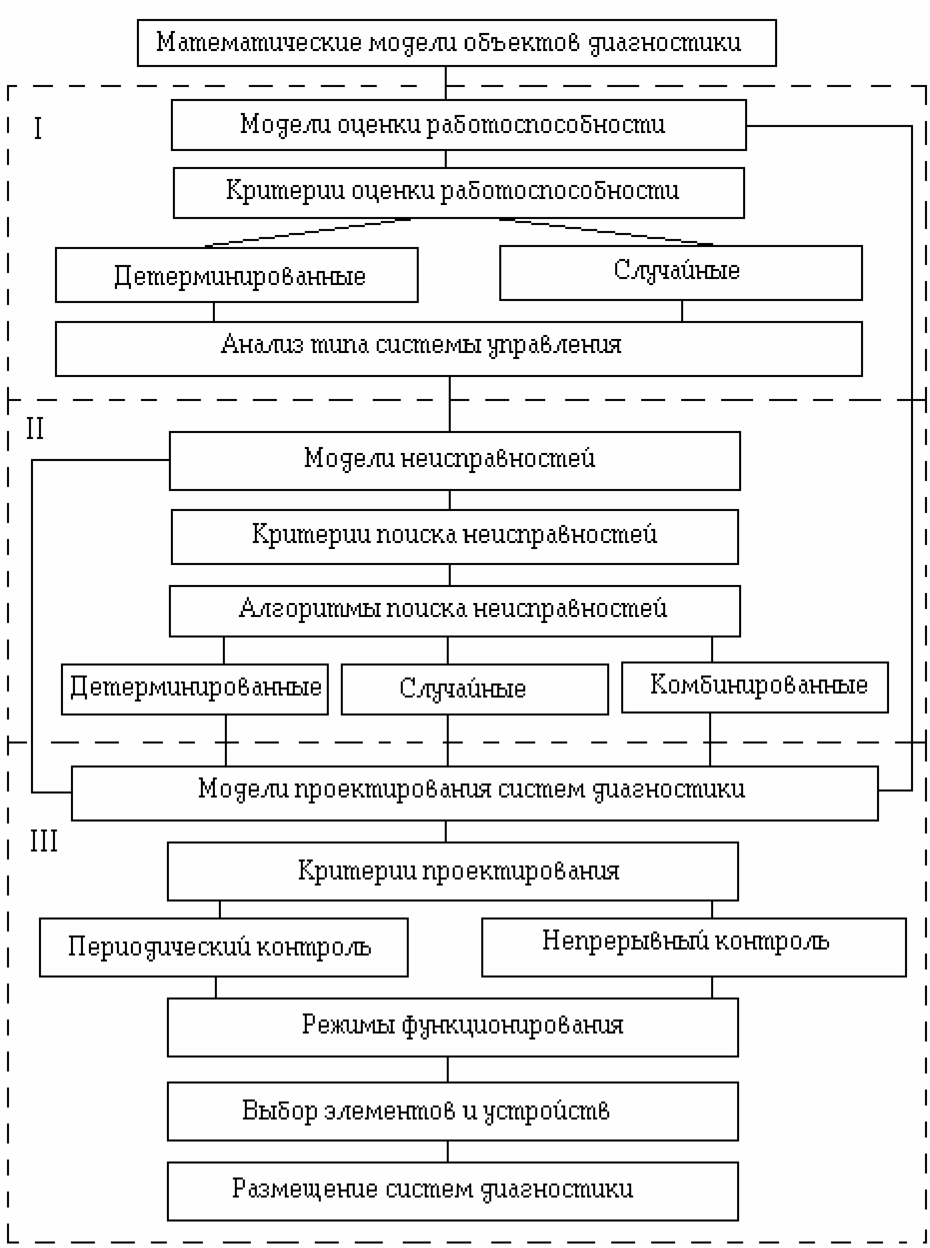

Рис.1.1. Организация технического диагностирования систем управления.

Состояние объекта диагностики в общем случае может быть описано ***n***-мерным вектором

$$\mathbf{X} = \begin{Vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \end{Vmatrix}, \qquad (1.1)$$

в котором x_1, x_2 …x_n- компоненты вектора.

Оператор перехода системы из одного состояния в другое может быть описан матрицей вида

$$
\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & . & . & . & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & . & . & . & a_{2n} \\ . & . & . & . & . & . \\ a_{n1} & a_{n2} & . & . & . & a_{nn} \end{Vmatrix}, \qquad (1.2)
$$

где a_{ij} – коэффициенты преобразования.

Модель дает возможность представить любые изменения состояния системы в виде линейных или нелинейных преобразований. Например, если вектор **X** характеризует исходное состояние системы, то ее производное состояние для линейного преобразования вида

$$
x_i = \sum_{j=1}^{n} a_j x_j , \qquad (1.3)
$$

может быть записано в виде

$$
\mathbf{X} = \mathbf{AX}\,. \qquad (1.4)
$$

Для широкого класса систем, описываемых дифференциальными уравнениями, математическая модель имеет вид

$$
\frac{dX}{dt} = A(t)X + F(t); \qquad X(0) = C, \qquad (1.5)
$$

где

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

- n-мерные векторы.

Вероятностная математическая модель объекта диагностики также может быть представлена в векторной форме. В этом случае оператор перехода в выражениях (1.4) и (1.5) является матрицей случайных величин.

Анализ математической модели объекта диагностики направлен на решение двух основных задач: получения качественной и количественной оценок влияния возможных отказов на работоспособность объекта и определения достаточного числа контролируемых параметров. При анализе математических моделей объектов диагностики существует два подхода. Первый заключается в том, что рассматривают максимально возможное число состояний объекта, определяемое числом элементов, из которых он состоит.

Второй подход предполагает разделение всего множества возможных состояний на главные и второстепенные, причем, последними можно пренебречь. Данный подход является основным при решении практических задач, поскольку учет всех возможных состояний может настолько усложнить модель объекта диагностики, что она станет непригодной для практического использования.

Объективной мерой степени упрощения модели объекта диагностики служит время, отводимое на восстановление системы, и цена отказа системы. Эти параметры взаимосвязаны и образуют единый критерий, характеризующий эффективность решения задач диагностики и значимость возможных последствий отказа системы.

2. МЕТОДЫ ПОИСКА ОТКАЗАВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Основной задачей рациональной организации поиска отказавшего элемента является сокращение времени и средств, затрачиваемых на поиск. Широко распространен метод поиска дефектов, при котором локализация места возникновения отказа осуществляется с помощью тестов. Практическая реализация теста заключается в том, что объект диагностики выводится из эксплуатации, на входы его элементов подаются некоторые воздействия, имитирующие рабочие сигналы и проводится контроль реакций элементов на эти сигналы. Предполагается, что исправному состоянию элемента соответствует наличие сигнала на его выходе, а неисправному – его отсутствие. При этом вводятся следующие допущения:

- объект диагностики и все его элементы допускают контроль с помощью тестовых сигналов;
- известны формы проявления отказов элементов и соответствующие изменения контролируемых параметров;
- отказ одного из элементов влечет за собой потерю работоспособности всего объекта;
- известны экономические характеристики поиска.

При использовании тестов стремятся минимизировать число тестовых воздействий, при которых может быть обнаружен дефект любого из элементов системы. Построению системы тестов, как правило, предшествует анализ функциональной модели системы и построение таблицы неисправностей. Простейшая схема объекта диагностики представлена на рис.2.1.

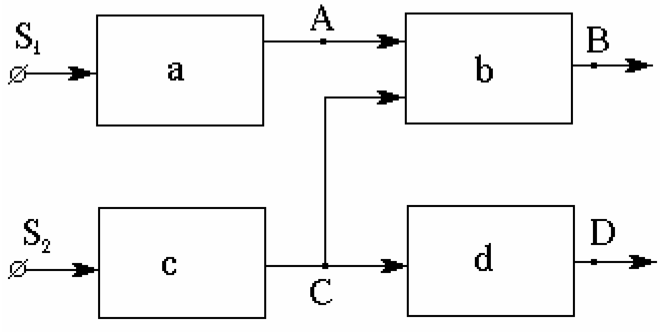

Рис.2.1. Структурная схема объекта диагностики.

На данном рисунке **a,b,c,d** – элементы объекта с соответствующими связями, $\mathbf{S_1}$ и $\mathbf{S_2}$ – входы, **B** и **D** – выходы. Таблица неисправностей этой системы может быть представлена в виде табл.2.1, в которой множество состояний объекта обозначено символом **E**, множество возможных проверок – символом **П**, исправное состояние элемента представлено, как **1**, а неисправное – как **0**.

Таблица 2.1.

Результаты тестового контроля.

Проверки **П**	Состояния объекта **E**				
	1111	0111	1011	1101	1110
$П_A$	1	0	1	1	1
$П_B$	1	0	0	0	1
$П_C$	1	1	1	0	1
$П_D$	1	1	1	0	0

Из таблицы следует, что пять возможных состояний объекта диагностики оказываются полностью различимыми с помощью четырех проверок.

С ростом числа элементов увеличивается число состояний объекта диагностики и, соответственно сложность процедуры тестирования. Минимизация алгоритма тестирования может быть проведена с использованием методов алгебры логики. Рассмотренный способ особенно эффективен при диагностировании дискретных систем.

Предположение об однозначности отказов, эквивалентное допущению о последовательном (в смысле надежности) соединении элементов, дает возможность использовать и другие методы построения алгоритмов поиска дефектов. К таким методам относится *метод половинного разбиения*.

Для системы из N последовательно соединенных элементов введем параметры оценки алгоритма поиска отказавшего элемента: t_i **–** среднее время проверки i – го элемента; $\mathbf{q_i}$ – вероятность отказа системы из-за отказа i – го элемента.

Величина $\mathbf{q_i}$ определяется, как

$$q_i = \frac{1 - p_i(t)}{1 - p_c(t)} = \frac{1\text{-}e^{-\lambda_i t}}{1\text{-}e^{-\lambda_c t}}\ , \qquad (2.1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента; $p_c(t)$ – вероятность безотказной работы системы; λ_i - интенсивность отказов i-го элемента; λ_i - интенсивность отказов системы. При малых интенсивностях отказов элементов и системы в целом выражение (2.1) можно представить в виде:

$$q_i \approx \frac{1\text{-}(1\text{-}\lambda_i t)}{1\text{-}(1\text{-}\lambda_c t)} = \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \qquad (2.2)$$

или

$$q_i = \frac{\lambda_i}{\sum\limits_{i=1}^{N} \lambda_i} \ . \qquad (2.4)$$

Задача поиска неисправного элемента состоит в нахождении такой последовательности проверок, при которой на поиск дефекта затрачивается минимум времени.

Рассмотрим методику построения алгоритма поиска отказавшего элемента при равенстве $q_1=q_2=\ldots=q_N$ и $\tau_1=\tau_2=\ldots=\tau_N$. Разделим условно систему на 2 части, содержащие, соответственно, m и N-m элементов. Неисправный элемент с вероятностью $p_1= m/N$ может находиться в цепочке из m элементов и с вероятностью $p_2= (N – m)/N$ – в цепочке из N – m элементов.

Математическое ожидание числа неисправных элементов определяется, как

$$M = mp_1 + (N - m)p_2 = \frac{m^2 + (N\text{-}m)^2}{N} . \qquad (2.5)$$

Функция (2.5) имеет минимум при m = N/2. Очевидно, что при этом отказавший элемент с равной вероятностью $p_1=p_2=0,5$ может находиться как в левой, так и в правой части системы.

Таким образом, при сформулированных условиях оптимальный порядок проведения проверок состоит в последовательном делении цепочки элементов пополам. Направление деления каждый раз определяется результатом теста в точке деления. При различных значениях $\mathbf{q_i}$ и t_i тестирование проводится также, исходя из равенства вероятностей нахождения отказавшего элемента слева или справа от точки деления, однако местоположение этой точки зависит от вышеназванных величин и, в каждом случае, определяется отдельно.

3. ПРИНЦИПЫ ДЕТЕРМИНИРОВАННОСТИ В ОРГАНИЗАЦИИ ПОИСКА ОТКАЗАВШЕГО ЭЛЕМЕНТА.

При создании новых совершенных систем управления решение задач диагностики осуществляется на стадии проектирования. Для большинства проектируемых систем расчетные значения характеристик надежности имеют низкую достоверность даже в том случае, когда используются элементы с известными показателями надежности. Последнее объясняется тем, что статистические данные, полученные для определенных сочетаний элементов и определенных режимов эксплуатации, не всегда или не в полной мере соответствуют для других сочетаний элементов и других режимов работы.

Наиболее объективными характеристиками, обеспечивающими эффективное решение задач диагностики, являются **относительные веса контролируемых параметров**. Весовые константы содержат объективную и достаточно полную информацию о надежностных свойствах и структурных особенностях системы управления и ее составляющих. С этой целью необходимо рассматривать элементы системы управления с точки зрения их информационных свойств. Взаимосвязь между информационными и энергетическими характеристиками элемента выражается соотношением:

$$WJ_a = \frac{W_m}{\eta_э}, \qquad (3.1)$$

где W – энергетический показатель качества элемента, $\eta_э$ – энергетический коэффициент полезного действия элемента, W_m – предельное значение энергии, характеризующее максимально возможную чувствительность элемента к повышению качества и J_a – коэффициент, определяющий информационные свойства элемента. Как показывает опыт разработки и эксплуатации систем управления, совершенствование качественных показателей системы (при постоянном значении $\eta_э$) ведет к снижению остальных величин.

Известно, что в информационно-управляющих устройствах число элементов N, в среднем, пропорционально показателю их качества ν:

$$\mathbf{N} = \mathbf{k}\, n\,, \qquad (3.2)$$

где коэффициент **k** характеризует эффективность схем, в которых используются элементы. Усложнение устройств и систем приводит к увеличению числа элементов и к ухудшению надежности. Средняя интенсивность отказов системы, содержащей элементы **m** типов, составит

$$\lambda_{cp} = \sum_{i=1}^{m} \rho_i \lambda_i\,, \qquad (3.3)$$

где ρ_i и λ_i, соответственно, доля и интенсивность отказов элементов i-го типа в системе. Среднее время наработки на отказ в этом случае определяется, как

$$T_{cp} = 1/N\lambda_{cp}\,. \qquad (3.4)$$

После подстановки в это соотношение уравнений (3.2) и (3.3) получим:

$$\nu T_{cp} = 1/k\lambda_{cp}\,. \qquad (3.5)$$

Таким образом, одновременное повышение качественных характеристик и надежности систем управления возможно только при улучшении надежности элементов (снижении $\lambda_{ср}$) и улучшении эффективности схемных решений (снижении k).

Опыт создания и эксплуатации систем управления показывает, что для выполнения наиболее существенных функций требуются элементы и узлы с наиболее сложной структурой. Сложность, в свою очередь, связана с относительным весом параметров, характеризующих элементы и узлы системы управления.

Относительный вес i-го контролируемого параметра может быть определен модулем его изменения:

$$V_i(a_0) = \left| \frac{a_i}{a_{i0}} \right|, \qquad (3.6)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} V_i(a) &= \left| \frac{a_i}{a_{iN}} \right| \quad \text{при} \quad a_i < a_{iN} \\ V_i(a) &= \left| \frac{a_{iN}}{a_i} \right| \quad \text{при} \quad a_i > a_{iN}, \end{aligned} \right\} \qquad (3.7)$$

где a_i – текущее значение i – го контролируемого параметра, a_{i0} – начальное значение i –го параметра, a_{iN} – номинальное значение i – го параметра.

Наиболее объективной характеристикой работоспособности систем автоматизации является их точность. В то же время, выбранный критерий работоспособности должен учитывать специфику процессов диагностирования, вероятностный характер отказов, экономические издержки диагностирования и др. Задача алгоритмизации процесса поиска дефекта наиболее эффективно решается при выборе в качестве определяющего параметра точности системы управления и с учетом вероятностных и экономических характеристик этой системы. В большинстве случаев алгоритм поиска неисправностей сводится к выбору последовательных решений по направлению поиска. В результате поиска должен максимизироваться критерий ***f(v)***, в качестве которого рассматриваются относительные веса каналов, трактов, блоков и элементов объекта диагностики.

4. ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАМЫХ СИСТЕМ.

Структурное и конструктивное разнообразие систем автоматизации затрудняет создание диной унифицированной системы диагностирования и приводит к необходимости учета особенностей конкретного объекта диагностики.

Для систем диагностирования любого типа характерны следующие режимы работы – непрерывный и периодический. Наиболее объективной оценкой эффективности диагностирования является коэффициент готовности системы.

Рассмотрим методику оценки влияния проверок, проводимых в ходе диагностирования на вероятность безотказной работы системы.Для простейших потоков отказов при периодическом диагностировании характерно равенство

$$\lambda_1 t_1 = \lambda_2 t_2, \qquad (4.1)$$

где λ_1 и t_1 – интенсивность отказов и длительность рабочего периода системы диагностирования, а λ_1 и t_1 интенсивность отказов и длительность нерабочего периода. Таким образом, на единицу времени работы системы диагностирования приходится нерабочий промежуток времени

$$t_2 = \lambda_1 / \lambda_2. \qquad (4.2)$$

Общее время эксплуатации системы определяется из соотношения:

$$T_{общ} = \sum_{i=1}^{k} t_i + \sum_{i=1}^{k} \frac{l_2}{l_1} t_i', \qquad (4.3)$$

где t_i' – время нахождения системы в нерабочем состоянии перед i-м включением, t_i – время работы системы после i-го включения и k – число включений системы. Данное соотношение позволяет считать систему условно работающей непрерывно в течение времени $T_{общ}$ при условии ее эксплуатации в промежутках времени t_i.

Выражение для вероятности безотказной работы системы из N элементов, в котором учитываются все предыдущие k проверок, имеет вид:

$$P(t, jT) = \prod_{i=1}^{N} \{ e^{-T/\bar{t}_i} + [(1-p_i)\frac{Q_i}{\bar{t}_i - Q_i}][e^{-T/\bar{t}_i} - e^{-T/Q_i}]\} \times$$
$$\times \prod_{i=1}^{N} \{ e^{-t/\bar{t}_i} + [(1-p_i)\frac{Q_i}{\bar{t}_i - Q_i}][e^{-t/\bar{t}_i} - e^{-t/Q_i}]\}. \qquad (4.4)$$

Здесь T – интервал времени, в конце которого выполняются операции диагностирования, $\bar{t}_i$ – среднее время безотказной работы i-го элемента, Q_i – средний нерабочий период i-го элемента. Поскольку число циклов диагностики k как правило, известно, то при заданной периодичности диагностирования T возможен расчет вероятности безотказной работы за время эксплуатации системы. Можно также определить интервал времени между проверками при заданном их числе или число проверок при заданной вероятности безотказной работы.

5. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ.

5.1. Задачи испытаний на надежность.

Проведение испытаний на надежность преследует две основные цели. Первой из них является экспериментальная оценка количественных характеристик надежности (безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтопригодности). Вторая, не менее важная цель – выяснение и анализ причин отказов, а также разработка рекомендаций по устранению этих причин и повышению надежности. Сущность испытаний сводится к тому, что некоторое число однотипных объектов включается в работу в заданных условиях эксплуатации. За работающими объектами ведется наблюдение, в процессе которого фиксируется первичная статистика – время работы, моменты возникновения отказов, время восстановления после отказа и т.д. По данным первичной статистики вычисляют оценки характеристик надежности.

Проводимые испытания классифицируются в зависимости от стоящих перед ними задач.

Определительные испытания проводятся с целью оценки фактической надежности испытуемых объектов. В результате определительных испытаний могут быть получены либо точечные либо интервальные оценки показателей надежности.

Контрольные испытания проводятся с целью оценки соответствия фактического уровня надежности испытуемых объектов заданному. При проведении контрольных испытаний количественная оценка характеристик надежности не производится, определяется лишь лучше или хуже эти показатели заданных значений.

5.2. Определительные испытания на надежность.

Определительные испытания проводятся с целью оценки фактической надежности объектов. При этом оцениваются либо сами показатели надежности, либо параметры распределений случайных величин, от которых зависит надежность объекта. Выборочный характер испытаний вносит элемент случайности в результаты испытаний, поэтому данные первичной статистики позволяют вычислить не истинные значения показателей надежности, а их оценки. Различают точечные и интервальные оценки показателей надежности.

Точечные оценки представляют собой усредненные числовые характеристики наблюдаемых в процессе испытаний случайных величин, определяющих надежность испытуемых объектов. Наиболее важными точечными оценками являются *выборочное среднее* и *выборочная дисперсия*.

Выборочное среднее вычисляется по результатам наблюдений, как

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}, \qquad (5.1)$$

где X_i – результат i-го наблюдения из серии n наблюдений и выборочная дисперсия - как

$$D[X] = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2}{n-1}. \qquad (5.2)$$

План испытаний на надежность представляет собой числовые параметры испытаний и указания по их проведению. Обозначение плана содержит три элемента, первый из которых представляет собой объем выборки n. Второй элемент определяет необходимость восстановления отказавших объектов – В – восстановление необходимо, Б – без восстановления. Третий элемент определяет продолжительность испытаний. Здесь возможны следующие варианты: Т – испытания должны продолжаться в течение заданного времени Т; r – испытания должны быть прекращены после возникновения заданного числа (r) отказов; (Т, r) – испытания должны продолжаться в течение заданного времени Т, если в течение этого времени число наблюдаемых отказов меньше заданного или должны закончиться при возникновении r отказов, если заданное время Т еще не истекло.

Например, план [n,B,r] означает, что для испытаний необходимо взять n объектов, отказавшие объекты должны заменяться новыми и испытания должны продолжаться до момента возникновения r-го отказа. Точечные оценки интенсивности отказов для шести типовых планов испытаний приведены в табл. 5.1. Определение времени проведения испытаний возможно лишь ориентировочное – на основании проектной оценки надежности или путем сравнения с аналогами, для которых надежность известна. В предположении соблюдения экспоненциального закона надежности средняя продолжительность испытаний составит

$$t_{исп} = r/(n\,l), \qquad (5.3)$$

где λ - расчетное значение интенсивности отказов объекта. Однако, планирование по средней продолжительности испытаний может привести к большим ошибкам. Большую достоверность обеспечивает планирование по заданному числу отказов

$$P(k \geq r) = 1 - \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(n\,l\,t_{исп})^i}{i!} \exp(-n\,l\,t_{исп}). \qquad (5.4)$$

Принимая эту вероятность достаточно высокой (≥0,9) и задаваясь двумя аргументами из трех можно определить искомую величину (n, r или $t_{исп}$).

Таблица 5.1.

План испытаний	Оценка интенсивности отказов λ	Примечания
[n,B,T]	$l = \frac{d(T)}{nT}$	d(T) – число отказов за время T
[n,B,r]	$l = \frac{r\text{-}1}{nt_r}$	t_r – момент возникновения – r-го отказа
[n,B,(r,T)]	$\lambda = \begin{cases} \frac{d(T)}{nT}, t_r > T \\ \frac{r\text{-}1}{nt_r}, t_r \le T \end{cases}$	
[n,Б,T]	$\text{л} = \frac{d(T)}{S_Б(T)}$	$S_Б(T)$ – суммарная наработка в момент T $S_Б(T) = \sum_{i=1}^{d} t_i + (n-d)T$
[n,Б,r]	$\text{л} = \frac{r\text{-}1}{S_Б(t_r)}$	$S_Б(T)$ – суммарная наработка в момент t_r $S_Б(t_r) = \sum_{i=1}^{r} t_i + (n-r)t_r$
[n,Б,(r,T)]	$\lambda = \begin{cases} \frac{d(T)}{S_Б(T)}, t_r > T \\ \frac{r\text{-}1}{S_Б(t_r)}, t_r \le T \end{cases}$	

Точечные оценки характеристик надежности не дают представления о точности и достоверности оцениваемых показателей. Поэтому во многих случаях пользуются интервальными оценками, определяющими границы некоторого интервала (доверительного), в котором находится оцениваемая величина с заданной (доверительной) вероятностью. Доверительный интервал характеризует вероятную ошибку при оценке показателя надежности, а доверительная вероятность – достоверность оценки. Вероятность нахождения оцениваемого параметра за границами доверительного интервала является дополнительной к доверительной вероятности и считается уровнем значимости. Поскольку определяемые оценки показателей надежности являются случайными величинами, процедура определения доверительных интервалов оценок заключается в отыскании функций распределения этих случайных величин и затем, в нахождении интервалов, в которые эти случайные величины попадают с доверительной вероятностью. Наиболее распространенными являются случаи экспоненциального и нормального распределений времени безотказной работы.

Пусть испытывается один восстанавливаемый объект, для которого время безотказной работы распределено по экспоненциальному закону, а время восстановления пренебрежимо мало. В ходе испытаний фиксируется r отказов и момент наступления последнего отказа t_r определяет суммарную наработку объекта за время испытаний:

$$t_r = \sum_{i=1}^{r} t_i, \tag{5.5}$$

где t_i – случайный промежуток времени между i-м и (i-1)- м отказами.

Определим доверительный интервал для среднего времени наработки на отказ T, который будет ограничен верхним $T_В$ и нижним $T_Н$ значениями при выполнении соотношения

$$P(T_Н < T < T_В) = P^* = 1 - \alpha, \tag{5.6}$$

где P* - доверительная вероятность, а α - уровень значимости.

Для решения этой задачи можно воспользоваться известным в теории надежности фактом, что при экспоненциальном распределении времени безотказной работы величина $2t_r /T$ имеет χ^2 распределение с 2r степенями свободы и плотность распределения этой величины определяется соотношением

$$f(c^2_{2r}) = \frac{1}{2^r \Gamma(r)} (c^2_{2r})^{r-1} \exp\left(-\frac{c^2_{2r}}{2} \right), \tag{5.7}$$

где $\Gamma(r)$ – гамма-функция, а $\chi^2_{2r} = 2t_r/T$.

По плотности распределения (рис.5.1) можно определить вероятность нахождения величины χ^2 в заданном интервале. Таким образом, для границ интервала χ^2_1 и χ^2_2 будем иметь:

$$P(c^2_1 < \frac{2t_r}{T} < c^2_2) = \int_{c^2_1}^{c^2_2} f(c^2_{2r}) dч^2_{2r} = P^* = 1 - a\ . \tag{5.8}$$

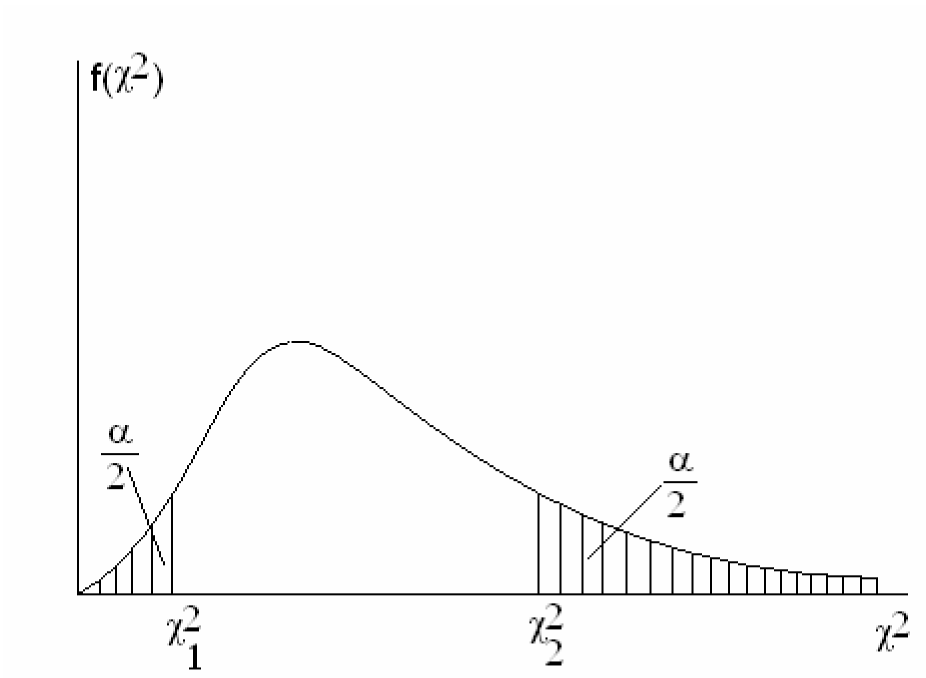

Рис.5.1. Кривая плотности χ^2 – распределения.

Известно, что величина доверительного интервала будет наименьшей, если заштрихованные на рис.5.1.области будут равными по площади. Следовательно, для определения границ доверительного интервала необходимо воспользоваться квантилями χ^2 – распределения для вероятностей $\alpha/2$ и $1\text{-}\alpha/2$. Тогда верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала можно вычислить из соотношений:

$$T_H = \frac{2t_r}{c^2_{a/2}(2r)}, \qquad (5.9)$$

$$T_B = \frac{2t_r}{c^2_{1-a/2}(2r)}. \qquad (5.10)$$

Значения квантилей χ^2 – распределения находят по таблице распределения (табл. 5.2) для 2r степеней свободы. Если испытания продолжаются после r-го отказа, (но не до наступления r+1-го отказа) то число степеней свободы при определении T_H и T_B увеличивается до 2r+2.

Если же в процессе испытаний отказы не наблюдались, то определяется только нижняя граница среднего времени наработки на отказ:

$$T_H = \frac{2t_0}{c^2_a(r)}, \qquad (5.11)$$

где t_0 – суммарная продолжительность испытаний, а значения квантилей χ^2распределения находят для r степеней свободы при уровне значимости α.

Таблица 5.2.

χ^2 – распределение.

m	α							
	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30
1	0,00016	0,0006	0,0039	0,016	0,064	0,148	0,455	1,07
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,67
4	0,30	0,43	0,71	1,06	1,65	2,19	3,36	4,9
5	0,55	0,75	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,1
6	0,87	1,13	1,63	2,2	3,07	3,83	5,35	7,2
7	1,24	1,56	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,4
8	1,65	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,5
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8
11	3,1	3,6	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3	12,9
12	3,6	4,2	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3	14,0
13	4,1	4,8	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3	15,1
14	4,7	5,4	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3	16,2
15	5,2	6,0	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3	17,3
16	5,8	6,6	8,0	9,3	11,2	12,6	15,3	18,4
17	6,4	7,3	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3	19,5
18	7,0	7,9	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3	20,6
19	7,6	8,6	10,1	11,7	13,7	15,4	18,3	21,7
20	8,3	9,2	10,9	12,4	14,6	16,3	19,3	22,8
21	8,9	9,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3	23,9
22	9,5	10,6	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3	24,9
23	10,2	11,3	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3	26,0
24	10,9	12,0	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3	27,1
25	11,5	12,7	14,6	16,5	18,9	20,9	24,3	28,2
26	12,2	13,4	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3	29,2
27	12,9	14,1	16,2	18,1	20,7	22,7	26,3	30,3
28	13,6	14,8	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3	31,4
29	14,3	15,6	17,7	19,8	22,5	24,6	28,3	32,5
30	15,0	16,3	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5

Продолжение таблицы 5.2.

m	α							
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
1	1,64	2,7	3,8	5,4	6,6	7,9	9,5	10,8
2	3,22	4,6	6,0	7,8	9,2	10,6	12,4	13,8
3	4,64	6,3	7,8	9,8	11,3	12,8	14,8	16,3
4	6,0	7,8	9,5	11,7	13,3	14,9	16,9	18,5
5	7,3	9,2	11,1	13,4	15,1	16,8	18,9	20,5
6	8,6	10,6	12,6	15,0	16,8	18,5	20,7	22,5
7	9,8	12,0	14,1	16,6	18,5	20,3	22,6	24,3
8	11,0	13,4	15,5	18,2	20,1	22,0	24,3	26,1
9	12,2	14,7	16,9	19,7	21,7	23,6	26,1	27,9
10	13,4	16,0	18,3	21,1	23,2	25,2	27,7	29,6
11	14,6	17,3	19,7	22,6	24,7	26,8	29,4	31,3
12	15,8	18,5	21,0	24,1	26,2	28,3	30,9	32,,9
13	17,0	19,8	22,4	25,5	27,7	29,8	32,5	34,5
14	18,2	21,1	23,7	26,9	29,1	31,3	34,0	36,1
15	19,3	22,3	25,0	28,3	30,6	32,8	35,6	37,7
16	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	34,3	37,1	39,3
17	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	35,7	38,,6	40,8
18	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	37,2	40,1	42,,3
19	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	38,6	41,6	43,8
20	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	40,0	43,0	45,3
21	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	41,4	44,5	46,8
22	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	42,8	45,9	48,3
23	28,4	32,0	35,2	39.0	41,6	44,2	47,3	49,7
24	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	45,6	48,7	51,2
25	30,7	34,4	37,7	41,6	44,3	46,9	50,1	65,6
26	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	48,3	51,6	54,1
27	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	49,6	52,9	55,5
28	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	51,0	54,4	56,9
29	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	52,3	55,7	58,3
30	36,3	40,3	43,8	48,0	50,9	53,7	57,1	59,7

При испытании объектов, время безотказной работы которых распределено по нормальному закону, границы доверительного интервала среднего времени наработки на отказ определяются следующим образом.

Пусть испытания на надежность n однотипных объектов длятся до отказа всех объектов (n=r). По данным первичной статистики могут быть вычислены оценки среднего времени наработки на отказ T и среднеквадратичного отклонения этой величины:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}, \tag{5.12}$$

$$s_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (t_i - T)^2}{n-1}}\ , \tag{5.13}$$

где t_i – наработка на отказ i-го объекта.

Поскольку время безотказной работы распределено по нормальному закону, то и сама оценка средней наработки на отказ распределена по нормальному закону с параметрами:

$$m_T = T = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}, \tag{5.14}$$

$$s_T = \frac{s_t}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (t_i - T)^2}{n(n-1)}} \tag{5.15}$$

Нормированная и центрированная кривая плотности распределения оценки T представлена на рис.5.2.

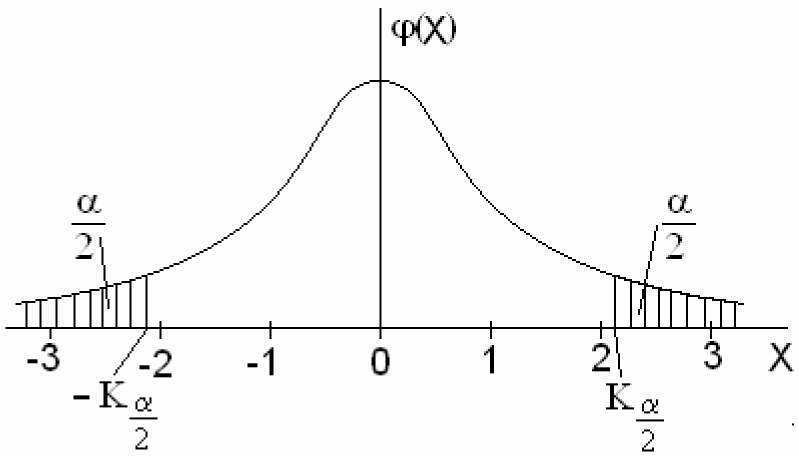

Рис.5.2. Кривая плотности нормального распределения оценки.

Деления на оси абсцисс соответствуют числу среднеквадратичных отклонений σ_T, укладывающихся в промежуток от нуля до данного деления. Квантиль $K_{\alpha/2}$ определяет границы промежутка [- $K_{\alpha/2}$, $K_{\alpha/2}$] в пределы которого попадает центрированная и нормированная случайная величина с вероятностью $(1 - \alpha)$. Заштрихованные на рис. 5.2 области соответствуют вероятностям $\alpha/2$, с которыми оценка Т будет расположена левее или правее указанного интервала. Переход от центрированной и нормированной случайной величины к оценке среднего времени наработки на отказ производится в соответствии с соотношением:

$$T = m_T \pm K_{\frac{a}{2}} s_T. \tag{5.16}$$

Таким образом, нижняя и верхняя границы доверительного интервала оценки среднего времени наработки на отказ при нормальном распределении времени безотказной работы определяются, как:

$$T_H = T - K_{\frac{a}{2}} \frac{s_t}{\sqrt{n}}; \tag{5.17}$$

$$T_B = T + K_{\frac{a}{2}} \frac{s_t}{\sqrt{n}}. \tag{5.18}$$

Значения квантилей $K_{\alpha/2}$ для наиболее часто используемых значений доверительной вероятности приведены в табл.5.3.

Таблица 5.3.

Доверительная вероятность $1-\alpha$	0,8	0,85	0,9	0,92	0,95	0,99	0,995	0,999
$K_{\alpha/2}$	1,28	1,44	1,64	1,75	1,96	2,58	2,81	3,29

Планирование определительных испытаний при нормальном распределении времени безотказной работы производится, исходя из требуемой точности оценки среднего времени наработки на отказ:

$$e = \pm K_{\frac{a}{2}} \frac{s_t}{\sqrt{n}}, \tag{5.19}$$

ожидаемого значения среднеквадратичного отклонения σ_t и доверительной вероятности. По этим данным рассчитывают число объектов, подлежащих испытаниям.

5.3. Контрольные испытания на надежность.

Целью контрольных испытаний на надежность является определение соответствия характеристик надежности партии объектов установленным требованиям. Контрольным испытаниям, как правило, подвергается относительно небольшая выборка из испытуемой партии, а полученные результаты распространяются на всю партию объектов.

Типовая процедура контрольных испытаний сводится к следующему: выборка объема n из испытуемой партии в N объектов ставится на испытания продолжительностью t часов. Зафиксированное за это время число отказов r сопоставляется с приемочным числом отказов c. По результатам сравнения делается один из возможных выводов – либо уровень надежности соответствует заданному ($r£\ c$) и партия принимается, либо уровень надежности не соответствует заданному ($r>c$) и партия бракуется.

Поскольку число наблюдаемых отказов случайно, имеется определенная вероятность того, что выводы, сделанные по результатам испытаний, будут ошибочными. При этом могут иметь место ошибки первого и второго рода.

Ошибка первого рода возникает тогда, когда партия объектов с уровнем надежности равным заданному или выше заданного бракуется по результатам выборочных испытаний. Вероятность ошибки первого рода (α) называется *риском поставщика*. Ошибка второго рода возникает тогда, когда партия объектов с уровнем надежности ниже заданного принимается по результатам выборочных испытаний. Вероятность ошибки второго рода (β) называется *риском заказчика*.

Связь между надежностью объектов проверяемой партии и вероятностью приемки партии по результатам выборочных испытаний устанавливается с помощью оперативной характеристики метода контроля. Под оперативной характеристикой понимают зависимость условной вероятности приемки партии от объема выборки n, приемочного числа c и уровня надежности H.

$$P_{пр}=\varphi(n, c, H). \qquad (5.20)$$

В большинстве случаев в качестве проверяемого показателя надежности используется вероятность отказа объекта q за время испытаний t_u или среднее время наработки на отказ T.

Идеальная оперативная характеристика (рис.5.3) устанавливает единичную вероятность приемки партии при соответствии уровня надежности заданному ($r£\ c$) и нулевую вероятность приемки, если зафиксированный уровень надежности хуже заданного ($r>c$). Для идеальной оперативной характеристики риски поставщика и заказчика равны нулю:

$$\alpha = 1 - P_{пр}(r\leq c) = 0; \beta = P_{пр}(r>c) = 0. \qquad (5.21)$$

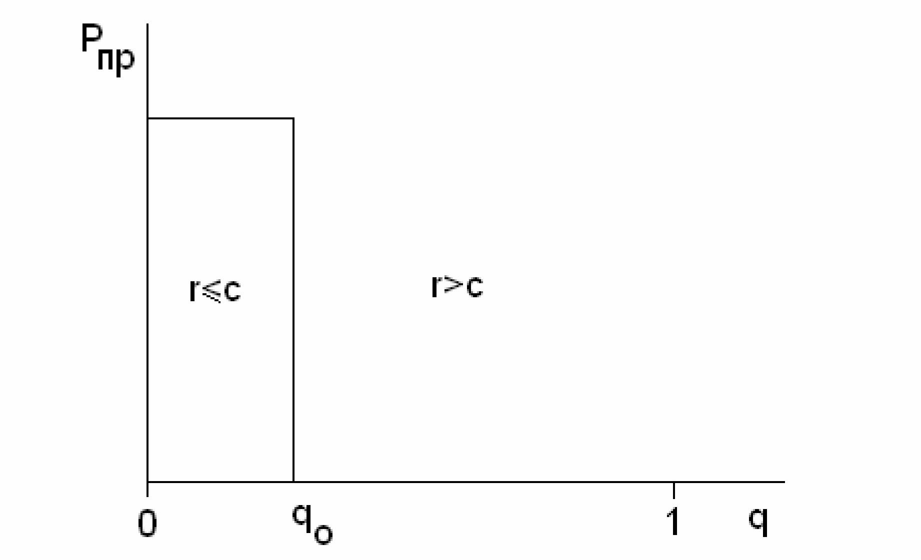

Рис. 5.3. Идеальная оперативная характеристика.

Главным достоинством метода контроля с идеальной оперативной характеристикой является его чувствительность. Однако, осуществление идеальной оперативной характеристики на практике связано с большими трудностями. Реальные оперативные характеристики являются некоторыми приближениями идеальной.

Простейшим случаем контрольных испытаний являются испытания партии, состоящей из одного объекта ($n = N = 1$; $c = 0$). Такой контроль может быть проведен с использованием одного (q_0 – приемочный уровень) или двух (q_0 – приемочный уровень и q_1 – браковочный уровень) значений вероятности отказа. При контроле надежности по одному уровню вероятность приемки партии равна вероятности безотказной работы объекта:

$$P_{пр}= 1 - q_0. \qquad (5.22)$$

В данном случае риск поставщика равен вероятности браковки объекта при условии, что вероятность отказа равна заданной, то есть:

$$\alpha = q_0 . \qquad (5.23)$$

Риск заказчика в данном случае равен нулю, так как требования к надежности объекта выполняются по условиям проведения испытаний.

При контроле надежности по двум уровням появляется и риск заказчика, который характеризует вероятность приемки партии с вероятностью отказа q_1 или хуже:

$$\beta = 1 - q_1. \qquad (5.24)$$

Оперативная характеристика для данного случая представлена на рис.5.4.

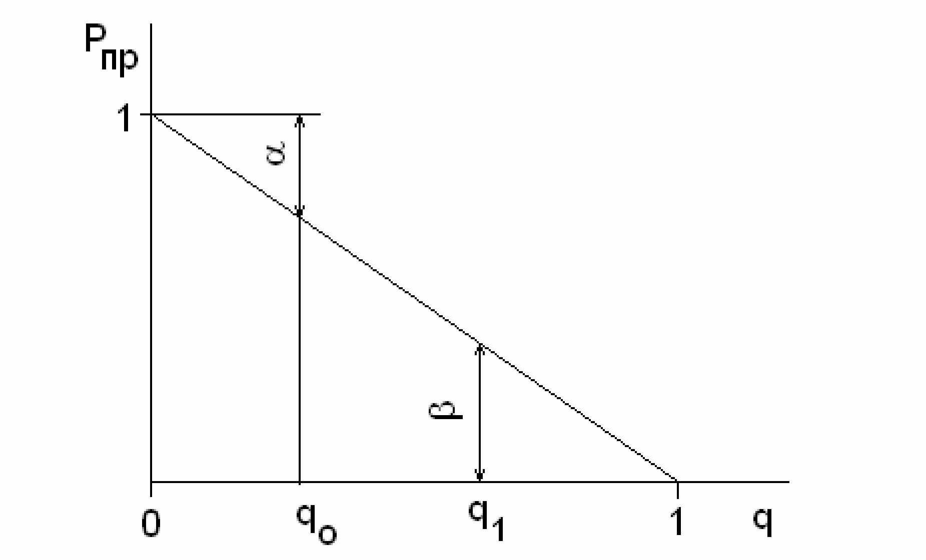

Рис. 5.4. Оперативная характеристика для $n = N = 1$; $c = 0$.

Следует отметить, что такая оперативная характеристика далека от идеальной. Она характеризуется низкой чувствительностью к изменениям фактического уровня надежности объектов и дает относительно высокую вероятность того, что объект будет принят с надежностью, близкой к браковочному уровню.

На практике при испытаниях небольших выборок ($n < 0{,}1N$) для формирования оперативной характеристики пользуются биномиальным распределением:

$$P_{пр} = \sum_{r=0}^{c} C_n^r q^r (1-q)^{n-r} . \qquad (5.25)$$

График оперативной характеристики для этого случая приведен на рис.5.5.

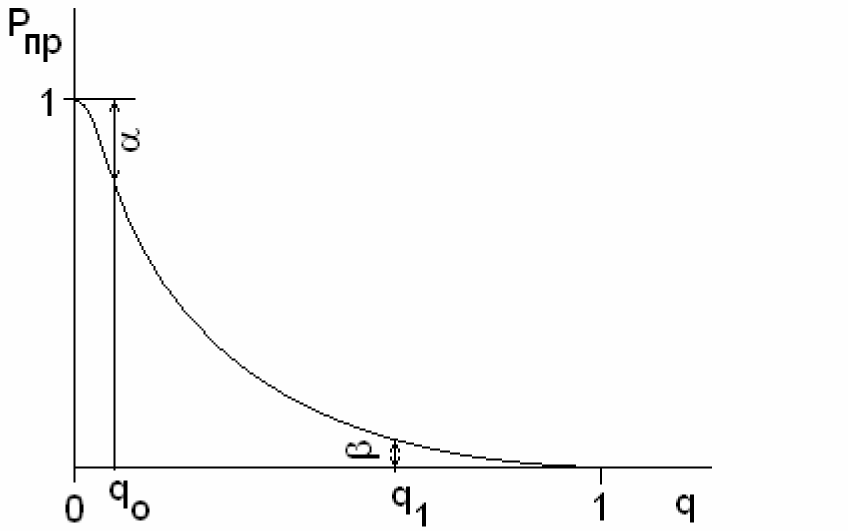

Рис.5.5. Оперативная характеристика контроля при биномиальном распределении $P_{пр}$.

Самым распространенным практическим случаем применения подобной оперативной характеристики является случай, когда приемочное число *c* равно нулю. Тогда уравнение (5.25) упрощается до следующего:

$$P_{пр} = (1–q)^n \;, \qquad (5.26)$$

а для рисков поставщика и заказчика можно записать:

$$\alpha = 1 – (1 – q_0)^n, \qquad (5.27) \qquad\qquad \beta = (1 – q_1)^n. \qquad (5.28)$$

При планировании контрольных испытаний, как правило, определяют объем выборки *n* и браковочный уровень вероятности отказов q_1 при известных значениях α, β и q_0. Результаты расчетов по уравнениям (5.27, 5.28) представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4.

q_0	α=0,05			α=0,10		
	n	q_1		n	q_1	
		β=0,05	β=0,10		β=0,05	β=0,10
0,00001	5180	0,00058	0,00044	10460	0,00028	0,00022
0,00003	1715	0,0017	0,0013	3521	0,00085	0,00065
0,00005	1028	0,0029	0,0023	2110	0,0014	0,0011
0,00007	734	0,0041	0,0031	1507	0,0020	0,0015
0,0001	514	0,0058	0,0045	1055	0,0028	0,0022
0,0003	172	0,0172	0,0133	353	0,0084	0,0065
0,0005	103	0,0286	0,0221	211	0,0141	0,0108
0,0007	74	0,0397	0,0306	151	0,0196	0,0151
0,001	52	0,0559	0,0432	106	0,0279	0,0215
0,003	17	0,161	0,126	35	0,0821	0,0637
0,005	11	0,238	0,189	21	0,133	0,104
0,007	8	0,311	0,250	15	0,181	0,142
0,01	6	0,393	0,319	11	0,238	0,189

Если приемочный и браковочный уровни вероятности отказов невелики (q_0, q_1 < 0,1) то планирование испытаний можно проводить с использованием распределения Пуассона, которое позволяет достаточно просто вычислить необходимые величины для произвольного приемочного числа *c*.

Оперативная характеристика для этого случая запишется в виде:

$$P_{пр} = \sum_{r=0}^{c} \frac{(nq)^r}{r!} e^{-nq}. \qquad (5.30)$$

Риски поставщика и заказчика при *c*=0 вычисляются из соотношений:

$$a = 1 - e^{-nq_o}, \quad (5.31) \qquad\qquad b = e^{-nq_1}. \quad (5.32)$$

Логарифмируя эти выражения, получим:

$$nq_o = -\ln(1 - a), \quad (5.33) \qquad\qquad nq_1 = -\ln b\,. \quad (5.34)$$

или
$$e = \frac{q_1}{q_0} = \frac{\ln b}{\ln(1 - a)} \quad (5.35)$$

В большинстве практических случаев можно принять, что время безотказной работы испытуемых объектов распределено по экспоненциальному закону, тогда:

$$q_0 = l_0 t_и, \quad (5.36) \qquad\qquad q_1 = l_1 t_и, \quad (5.37)$$

где λ_o и λ_1 – приемлемый и браковочный уровни интенсивности отказов, а $t_и$ – продолжительность испытаний. Величина λ_1 обычно устанавливается из условия:

$$P(t_p) = e^{-l_1 t_p} \quad (5.38) \quad \text{или} \quad l_1 t_p = -\ln P(t_p), \quad (5.39)$$

где $P(t_p)$ – браковочный уровень вероятности безотказной работы за время t_p.

Из уравнений (5.34), (5.37) и (5.39) получаем:

$$\frac{nt_и}{t_p} = \frac{\ln b}{\ln P(t_p)} \quad (5.40)$$

Результаты расчетов по приведенным выше уравнениям представлены в табл. 5.5 – 5.8.

Таблица 5.5.

Значения $\varepsilon = q_1/q_0$ при c = 0.

β \ α	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30
0,001	6908	687	135	65,6	31,0	19,4
0,01	4605	458	89,8	43,7	20,6	12,9
0,05	2996	298	58,4	28,4	13,4	8,4
0,1	2303	229	44,9	21,9	10,3	6,5
0,2	1609	160	31,4	15,3	7,2	4,5
0,3	1204	120	23,5	11,4	5,4	3,4

Таблица 5.6.

Объем выборки *n* при с = 0

q_0 \ α	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30
10^{-5}	100	1005	5129	10536	22314	35667
10^{-4}	10	100	513	1054	2231	3567
10^{-3}	1	10	51	105	223	357
0,01	-	1	5	10	22	36
0,10	-	-	-	1	2	4
q_1 \ β	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30
10^{-5}	$69{\cdot}10^4$	$46{\cdot}10^4$	$30{\cdot}10^4$	$23{\cdot}10^4$	$16{\cdot}10^4$	$12{\cdot}10^4$
10^{-4}	$69{\cdot}10^3$	$46{\cdot}10^3$	$30{\cdot}10^3$	$23{\cdot}10^3$	$16{\cdot}10^3$	$12{\cdot}10^4$
10^{-3}	6908	4605	2996	2303	1609	1204
0,01	691	461	300	230	161	120
0,10	69	46	30	23	16	12

Таблица 5.7.

Значения $n\dfrac{t_и}{t_р}$ при с = 0

$P(t_р)$ \ β	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30
0,90	66	44	28	22	15	11
0,99	687	458	298	229	160	120
0,999	6908	4605	2996	2303	1609	1204
0,9999	$69{\cdot}10^3$	$46{\cdot}10^3$	$30{\cdot}10^3$	$23{\cdot}10^3$	$16{\cdot}10^3$	$12{\cdot}10^3$
0,99999	$69{\cdot}10^4$	$46{\cdot}10^4$	$30{\cdot}10^4$	$23{\cdot}10^4$	$16{\cdot}10^4$	$12{\cdot}10^4$

Таблица 5.8.

Риски поставщика и заказчика при c = 0

ε	Значения β			Значения α		
	α=0,05	α=0,10	α=0,20	β=0,05	β=0,10	β=0,20
1,1	0,945	0,890	0,782	0,934	0,877	0,768
1,2	0,940	0,881	0,765	0,917	0,853	0,738
1,4	0,932	0,862	0,732	0,882	0,807	0,683
1,6	0,921	0,845	0,700	0,846	0,763	0,634
1,8	0,912	0,827	0,669	0,811	0,722	0,591
2	0,902	0,810	0,640	0,776	0,684	0,553
2,5	0,880	0,768	0,572	0,698	0,602	0,475
3	0,857	0,729	0,512	0,631	0,536	0,415
4	0,815	0,656	0,410	0,527	0,438	0,331
5	0,774	0,590	0,328	0,451	0,369	0,275
6	0,735	0,531	0,262	0,393	0,319	0235
7	0,698	0,478	0,210	0,348	0,281	0,205
8	0,664	0,430	0,168	0,312	0,250	0,182
9	0,630	0,387	0,134	0,283	0,226	0,164
10	0,599	0,349	0,107	0,259	0206	0,149
12	0,540	0,282	0,069	0,221	0,175	0,125
14	0,488	0,229	0,044	0,193	0,151	0,109
16	0,440	0,185	0,028	0,171	0,134	0,096
18	0,397	0,150	0,018	0,153	0,120	0,085
20	0,358	0,121	0,012	0,139	0,109	0,077
25	0,277	0,072	0,004	0,113	0,088	0,062
30	0,215	0,042	0,001	0,095	0,074	0,052
35	0,166	0,025	-	0,082	0,064	0,045
40	0,128	0,015	-	0,072	0,056	0,039
45	0,099	0,009	-	0,064	0,050	0,035
50	0,077	0,005	-	0,058	0,045	0,031
60	0,046	0,002	-	0,049	0,038	0,027
80	0,016	-	-	0,036	0,028	0,020
100	0,006	-	-	0,030	0,023	0,016

С помощью таблиц 5.5 – 5.8 можно решать разнообразные задачи по планированию испытаний с минимальной выборкой (при c = 0): определение объема выборки и браковочного уровня надежности при заданных значениях рисков; определение объема выборки при известном браковочном уровне интенсивности отказов и заданной длительности испытаний; определение объема выборки для заданной длительности испытаний при известной вероятности безотказной работы за фиксированный промежуток времени; определение объема выборки, рисков поставщика и заказчика при заданных уровнях надежности и др.

В некоторых случаях условие приемки с = 0 является чрезмерно жестким и затрудняет проведение испытаний. В этих случаях уравнения (5.30) – (5.32) могут быть распространены на произвольное приемочное число *c* . Например, для с = 1 имеем:

$$P_{пр} = e^{-nq}(1+nq)\,; \tag{5.41}$$

$$a = 1 - e^{-nq_0}(1+nq_0); \tag{5.42}$$

$$b = e^{-nq_1}(1+nq_1). \tag{5.43}$$

При проведении расчетов по этим уравнениям обычно пользуются следующими величинами:

$$h = \frac{q_0}{q_1} = \frac{T_1}{T_0}, \tag{5.44}$$

где T_0 и T_1 – приемлемый и браковочный уровни наработки на отказ;

$$a = nq_0 \quad (5.45) \qquad \text{или} \qquad a = \frac{t_и}{T_0} \quad (5.46)$$

$$h = \frac{a}{c}. \tag{5.47}$$

Значения η приведены в табл. 5.9, а значения a и h – в табл.5.10.

С помощью таблиц 5.9 и 5.10 решаются следующие задачи планирования контрольных испытаний на надежность: определяются объем выборки *n* и приемочное число *c* при известных значениях рисков поставщика и заказчика, приемлемых и браковочных уровнях надежности объектов; объем выборки *n* и приемочное число *c* при известных значениях рисков поставщика и заказчика, приемлемых и браковочных уровнях интенсивности отказов объектов и фиксированной длительности испытаний; определяются длительность испытаний и нормативная наработка на отказ

$$T_н = hT_0 \tag{5.48}$$

при известных значениях рисков поставщика и заказчика, приемлемых и браковочных уровнях времени безотказной работы.

Таблица 5.9.

c	$\eta \cdot 100$								
	$\alpha=0,05$			$\alpha=0,10$			$\alpha=0,20$		
	$\beta=0,05$	$\beta=0,10$	$\beta=0,20$	$\beta=0,05$	$\beta=0,10$	$\beta=0,20$	$\beta=0,05$	$\beta=0,10$	$\beta=0,20$
0	1,7	2,2	3,2	3,5	4,6	6,6	7,4	9,7	14
1	7,5	9,1	12	11	14	18	17	21	28
2	13	16	19	18	21	26	24	29	36
3	18	20	25	22	26	32	30	34	42
4	22	25	29	27	30	36	34	39	46
5	25	29	33	30	34	40	37	42	49
6	28	31	36	33	37	43	40	45	52
7	30	34	39	35	40	45	43	48	55
8	32	36	41	38	42	48	45	50	57
9	35	38	44	40	44	50	46	51	58
10	36	40	45	41	45	51	48	53	60
11	38	42	47	43	47	53	50	55	61
12	40	43	48	45	49	54	51	56	62
13	41	45	50	46	50	56	52	57	63
14	42	46	51	47	51	57	53	58	64
15	44	47	52	48	52	58	54	59	65
16	45	48	53	49	53	59	55	60	66
17	46	49	54	50	54	60	56	61	67
18	47	50	55	51	55	61	57	62	68
19	48	51	56	52	56	62	58	62	69
20	48	52	57	53	57	62	59	63	70
22	50	54	58	54	58	64	60	64	70
24	52	55	60	56	60	65	61	66	71
26	53	56	61	57	61	66	62	67	72
28	54	58	62	58	62	67	64	68	73
30	55	59	63	59	63	68	65	69	74
35	58	61	65	62	65	70	67	71	76
40	60	63	67	64	67	72	68	72	77
45	61	65	69	65	68	73	70	73	78

Таблица 5.10

c	a			h		
	α = 0,05	α = 0,10	α = 0,20	α = 0,05	α = 0,10	α = 0,20
0	0,05	0,11	0,22	-	-	-
1	0,36	0,50	0,82	0,36	0,50	0,82
2	0,82	1,1	1,5	0,41	0,55	0,77
3	1,4	1,7	2,3	0,45	0,58	0,77
4	2,0	2,4	3,1	0,49	0,61	0,77
5	2,6	3,2	3,9	0,52	0,63	0,78
6	3,3	3,9	4,7	0,55	0,65	0,79
7	4,0	4,7	5,6	0,57	0,67	0,80
8	4,7	5,4	6,5	0,59	0,68	0,81
9	5,4	6,2	7,3	0,60	0,69	0,81
10	6,2	7,0	8,2	0,62	0,70	0,82
11	6,9	7,8	9,0	0,63	0,71	0,82
12	7,7	8,6	9,9	0,64	0,72	0,83
13	8,4	9,5	11	0,65	0,73	0,83
14	9,2	10	12	0,66	0,74	0,84
15	10	11	12	0,67	0,75	0,84
16	11	12	13	0,68	0,75	0,84
17	12	13	14	0,68	0,75	0,85
18	12	14	15	0,69	0,76	0,85
19	13	15	16	0,69	0,77	0,85
20	14	15	17	0,70	0,77	0,86
22	16	17	19	0,71	0,78	0,86
24	17	19	21	0,72	0,78	0,86
26	19	21	23	0,73	0,79	0,87
28	21	22	24	0,74	0,80	0,87
30	22	24	26	0,75	0,80	0,87
35	27	29	31	0,76	0,82	0,88
40	31	33	36	0,78	0,82	0,89
45	35	38	40	0,79	0,83	0,89
50	40	42	45	0,79	0,84	0,90

6. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ.

1. Определить оценку интенсивности отказов по результатам определительных испытаний на надежность (планы испытаний – в табл. 5.1): $n=35$; $T=50$ час; $d(T)=r=4$; $t_r=45$ час; $t_1=40$ час; $t_2=42$ час; $t_3=44$ час; $t_4=45$ час.

2. Определить границы доверительного интервала для среднего времени наработки на отказ при $t_и$=500 час; t_1=350 час; t_2=380 час; t_3=387 час; t_4=398 час и уровне значимости α = 0,05 (время безотказной работы распределено по экспоненциальному закону) .
3. Определить границы доверительного интервала для среднего времени наработки на отказ при $t_г$=398 час; t_1=350 час; t_2=380 час; t_3=387 час; t_4=398 час и уровне значимости α = 0,05 (время безотказной работы распределено по экспоненциальному закону).
4. Определить границы доверительного интервала для среднего времени наработки на отказ при $t_г$=200 час; t_1=150 час; t_2=180 час; t_3=187 час; t_4=200 час и уровне значимости α = 0,05 (время безотказной работы распределено по нормальному закону).
5. Определить объем выборки n контрольных испытаний и браковочный уровень надежности q_1 при q_0=0,01; α=β=0,10; c=0 с использованием биномиального распределения.
6. Определить объем выборки n контрольных испытаний и браковочный уровень надежности q_1 при q_0=0,001; α=0,05; β=0,10; c=0 с использованием распределения Пуассона.
7. Найти объем выборки n для проверки интенсивности отказов при $\lambda_1=10^{-5}$1/час; $t_и$=100 час; β=0,10; c=0.
8. Найти объем выборки n для проверки интенсивности отказов при $P(t_p)$=0,999 час; t_p=10 час; $t_и$=1000 час; β=0,10; c=0.
9. Найти объем выборки n и риск заказчика β при q_0=0,001; q_1=0,01; α=0,10; c=0.
10. Найти объем выборки n и приемочное число c при q_0=0,01; q_1=0,02; α=0,05; β=0,10.
11. Найти объем выборки n и приемочное число c при $\lambda_0=10^{-6}$; $\lambda_1=10^{-5}$; α=β=0,10; $t_и$=1000 час.
12. Определить длительность контрольных испытаний $t_и$ и нормативную наработку $T_н$ при T_0 =100 час; T_1=50 час; α=0,10; β=0,05.

Список литературы

1. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
2. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. М.: Сов.Радио, 1978, 262 с.
3. Шор Я.Б. Статистические методы анализа контроля качества и надежности. М.: Сов. Радио, 1962, 552 с.
ние. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
4. Надежность технических систем: Справочник/ Р.Барлоу,

Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев и др.; Под ред. И.А.Ушакова – М.: Радио и связь, 1985. 606 с.

СОДЕРЖАНИЕ