

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Методические указания к самостоятельной работе по курсу «Диагностика и надежность автоматизированных систем» для студентов дневного и заочного обучения по направлениям «Управление в технических системах» и «Автоматизация технологических процессов и производств»

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Методические указания к самостоятельной работе по курсу
«Диагностика и надежность автоматизированных систем» для студентов
дневного и заочного обучения по направлениям «Управление в технических
системах» и «Автоматизация технологических процессов и производств»

Составитель А.П.Самарский

Иваново 2015

УДК 681.51 – 192 (075.8)

Составитель А.П. Самарский

Основы надежности автоматизированных систем: метод. указания к самостоятельной работе по курсу «Диагностика и надежность автоматизированных систем» для студентов дневного и заочного обучения по направлениям «Управление в технических системах» и «Автоматизация технологических процессов и производств»/ сост. А.П.Самарский; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. Иваново, 2015. 36с.

В методических указаниях даны определения основных характеристик надежности элементов и систем автоматизации и управления и приведены методы расчета этих характеристик. Рассмотрены методы повышения надежности систем контроля и управления путем резервирования. Приведены параметры надежности некоторых наиболее распространенных элементов систем автоматизации; даны задания для самостоятельного решения

Ил. 11. Библиогр.: 8 назв.

Рецензент

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

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Согласно **ГОСТ 27.002-89**, надежность – это свойство объектов и систем выполнять все заданные функции в течение определенного времени с сохранением всех параметров, характеризующих качество функционирования, в установленных пределах. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

В применении к автоматизированным системам управления понятие надежности можно сформулировать следующим образом.

Надежность – это свойство системы выполнять все заданные функции по сбору, обработке и передаче технологической информации, а также по управлению технологическим объектом в течение заданного времени с заданными точностью и быстродействием.

Основными понятиями теории надежности систем управления являются следующие.

Объект – элемент системы управления или система, рассматриваемая как совокупность элементов.

Состояние объекта – способность выполнять все заданные функции или часть заданных функций. Множество возможных состояний объекта делится на работоспособные и неработоспособные. В работоспособном состоянии объект способен выполнять с заданными показателями качества все заданные функции или часть заданных функций. Для многофункциональных объектов, какими являются автоматизированные системы управления, состояние объекта определяется набором функций, которые способен выполнять объект в данный момент.

Работоспособность – свойство объекта выполнять заданные функции в текущий момент времени.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени.

Отказ – полная или частичная утрата объектом работоспособности вследствие возникающих неисправностей. Классификация отказов приведена в табл.1.1. При внезапных отказах параметры функционирования объекта изменяются скачкообразно, а при постепенных такие изменения описываются непрерывной функцией времени. При полных отказах дальнейшая эксплуатация объекта становится невозможной, а при частичных он может функционировать, выполняя часть заданных функций. Очевидные отказы проявляются сразу после возникновения, а скрытые могут оставаться необнаруженными в течение некоторого времени. Устойчивые отказы после возникновения сохраняются сколь угодно долго, а самоустраняющиеся (сбои) могут самопроизвольно ликвидироваться в произвольные моменты времени. Независимые отказы возникают по случайным причинам в произвольные моменты времени. Зависимые отказы являются следствием независимых. Причиной конструктивных отказов являются ошибки, допущенные при разработке и проектировании объекта,

Таблица 1.1.

Классификация отказов

Классификационные признаки	Виды отказов
Характер изменения параметров объекта в момент отказа	Внезапные, постепенные
Возможность использования объекта после отказа	Полные, частичные
Внешние проявления отказа	Очевидные, скрытые
Устойчивость отказа	Устойчивые, самоустраняющиеся
Зависимость между отказами	Независимые, зависимые
Причина возникновения	Конструкционные, технологические, эксплуатационные
Природа происхождения	Естественные, искусственные

причиной технологических – ошибки, допущенные при изготовлении или монтаже объекта, а причиной эксплуатационных – нарушения правил эксплуатации объекта. Естественные отказы возникают самопроизвольно в ходе эксплуатации объекта, а искусственные вызываются преднамеренно в ходе испытаний на надежность.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность в течение установленного срока службы с перерывами на техническое обслуживание и ремонт. Срок службы объекта ограничивается предельным состоянием.

Предельное состояние – это состояние объекта, при котором его эксплуатация должна быть прекращена вследствие нарушения требований к качеству функционирования, безопасности функционирования или к величине эксплуатационных расходов.

Ремонтопригодность – качественная характеристика приспособленности объекта к обнаружению и устранению отказов. По ремонтнопригодности объекты подразделяются на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Восстанавливаемые объекты после возникновения отказов подлежат восстановлению, а невосстанавливаемые заменяются новыми.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного срока хранения и при транспортировке.

Восстановление – обнаружение, локализация и устранение отказов.

Резервирование – использование дополнительных средств и возможностей (сверх минимально необходимых) для улучшения характеристик надежности объекта.

1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Качественное определение надежности является недостаточным, так как не позволяет: 1) учитывать надежность аппаратуры при планировании использования автоматизированных систем управления на различных объектах; 2) формулировать требования к надежности проектируемой аппаратуры; 3) сравнивать различные варианты построения системы; 4) рассчитывать необходимый ЗИП, сроки службы и т. д.

В связи с этим возникает необходимость введения количественных характеристик надежности. Поскольку отказы и сбои элементов являются случайными событиями, то теория вероятностей и математическая статистика являются основным аппаратом, используемым при исследовании надежности, а сами характеристики надежности должны выбираться из числа показателей, принятых в теории вероятностей.

Для технического обеспечения автоматизированных систем выбор характеристик надежности должен осуществляться с учетом особенностей функционирования системы на различных объектах. Множество характеристик надежности, как правило, делят на три группы: характеристики безотказности, характеристики восстановления и характеристики резервирования. В ходе проектной и эксплуатационной оценки надежности используются следующие характеристики безотказности.

1. Вероятности отказа и безотказной работы. Вероятность отказа $Q(t)$ представляет собой вероятность того, что к моменту времени t в системе или в элементе возникнет отказ. Дополнительная вероятность безотказной работы $P(t)$ характеризует вероятность того, что к моменту времени t элемент или система не откажут. Перечисленные вероятности связаны следующим соотношением:

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (1.1)$$

Очевидно, что $0 < P(t) < 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Следует отметить, что функция $P(t)$ является монотонно убывающей (надежность в процессе эксплуатации может только убывать), а функция $Q(t)$ — монотонно возрастающей.

Для определения величины $P(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.2)$$

где N_0 — число изделий, поставленных на испытание или на эксплуатацию; $n(t)$ — число изделий, отказавших за время t .

2. Вероятность бессбойной работы — вероятность того, что к моменту времени t будут отсутствовать сбои системы или отдельных элементов. Эта характери-

стика связана с функцией распределения времени бессбойной работы следующим соотношением:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t), \quad (1.3)$$

где $P_c(t)$ – вероятность отсутствия сбоев; $Q_c(t)$ – функция распределения времени бессбойной работы, которая представляет собой вероятность появления сбоя в течение времени t . Для определения величины $P_c(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$P(t) = \frac{N_o - n_c(t)}{N_o}, \quad (1.4)$$

где N_o – число изделий, поставленных на испытание или на эксплуатацию, $n_c(t)$ – число изделий, у которых произошел сбой в течение времени t .

3. **Частота отказов** представляет собой плотность распределения времени безотказной работы или производную от вероятности безотказной работы:

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

Для определения величины $a(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_o \Delta t}, \quad (1.6)$$

где $n(\Delta t)$ – число изделий, отказавших на отрезке времени $[t - \Delta t/2, t + \Delta t/2]$. Аналогично можно определить частоту сбоев.

4. **Интенсивность отказов** представляет собой условную плотность распределения времени безотказной работы для момента времени t при условии, что до этого момента отказов не было:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \quad (1.7)$$

Так как $P(t) \leq 1$, то, очевидно, всегда выполняется соотношение $\lambda(t) \geq a(t)$. Для определения величины $\lambda(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (1.8)$$

где $N_{cp} = (N_{нач} + N_{кон})/2$ – среднее число объектов, исправно работающих на отрезке времени Δt ; $N_{нач}$ и $N_{кон}$ – число объектов, исправно работающих в начале и в конце интервала времени Δt .

Отметим важную особенность, вытекающую из формулы (1.7) для высоконадежных систем. Если $P(t) \geq 0,99$, то $a(t) \approx \lambda(t)$. Различие этих величин в данном случае не превышает 1%, что вполне соответствует погрешности статистического определения величин $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Следует подчеркнуть различия между величинами $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Элементарная вероятность $a(t)dt$ характеризует вероятность отказа на отрезке времени $[t, t+dt]$ системы или элемента, произвольно взятых из группы таких же систем или элементов, причем неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится элемент или система. Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа на отрезке времени $[t, t+dt]$ системы или элемента, взятых из группы элементов или систем, которые остались работоспособными к моменту времени t .

Таким образом, в практических расчетах возможна соответствующая замена отдельных величин.

Интегрируя выражение (1-7), имеем:

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t) \quad \text{или} \quad P(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t)dt \right]. \quad (1.9)$$

Если $\lambda(x)=\text{const}$, то тогда $P(t)=e^{-\lambda t}$ и $a(t)=\lambda e^{-\lambda t}$. Данный случай широко встречается в практике. Соотношение (1.9) характеризует **экспоненциальный закон надежности**.

Опыт эксплуатации систем автоматизации и управления показывает, что интенсивность отказов с течением времени определенным образом изменяется (рис.1).

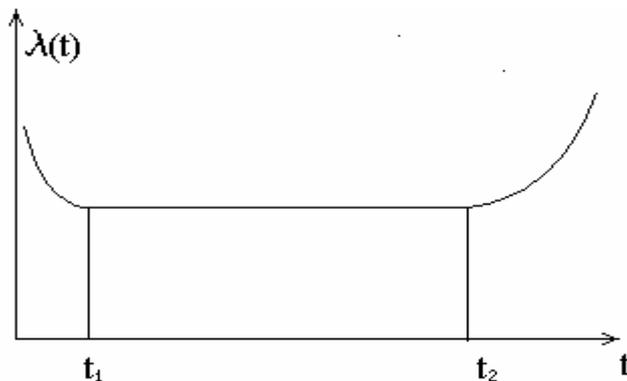


Рис 1. Временная зависимость интенсивности отказов

Как видно из рис.1, на временной зависимости интенсивности отказов можно выделить три участка. На участке $[0, t_1]$ интенсивность отказов достаточно высока и убывает с течением времени. На этом участке отказывают все малонадежные элементы и узлы и сам участок носит название *участка приработки*. Для аппаратуры систем автоматизации длительность приработки составляет десятки, а иногда даже и сотни часов. Второй участок $[t_1, t_2]$ – участок нормальной эксплуатации – характеризуется достаточно низким и постоянным значением интенсивности отказов. Длительность этого участка составляет десятки тысяч часов. На третьем участке ($t > t_2$) интенсивность отказов резко возрастает из-за износа и старения. На этом участке эксплуатация объектов прекращается.

5. **Среднее время наработки на отказ** представляет собой математическое ожидание времени безотказной работы. Исходя из известных соотношений теории вероятностей, можно записать:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t a(t) dt. \quad (1.10)$$

Это выражение можно преобразовать к виду:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.11)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеем:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.12)$$

Для определения средней наработки до отказа используется следующая статистическая оценка:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (1.13)$$

где t_i – время безотказной работы i -го изделия.

Количественные характеристики восстановления описывают процессы обнаружения, локализации и устранения отказов в системах. Если характеристики безотказности являются сугубо объективными величинами, то на характеристики восстановления влияют и субъективные факторы – уровень организации и оснащённости ремонтной службы, квалификация и дисциплинированность ремонтного персонала и др.

6. Вероятность восстановления – вероятность того, что отказавшее изделие будет восстановлено в течение заданного времени t . Указанная характеристика представляет собой функцию распределения времени восстановления и равна:

$$S(t) = Q_B(t). \quad (1.14)$$

Для определения величины $S(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$S(t) = \frac{N_B(t)}{N_{\text{ОВ}}}, \quad (1.15)$$

где $N_{\text{ОВ}}$ – число изделий, поставленных на восстановление; $N_B(t)$ – число изделий, время восстановления которых было меньше t .

7. Частота восстановления – плотность распределения времени восстановления:

$$a_B(t) = \frac{dS(t)}{dt}. \quad (1.16)$$

Для определения величины $a_B(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$a_B(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{OB} \Delta t}, \quad (1.17)$$

где $n_B(\Delta t)$ – число изделий, восстановленных на отрезке времени $[t-\Delta t/2, t+\Delta t/2]$.

8. Интенсивность восстановления – условная плотность распределения времени восстановления для момента времени t при условии, что до этого момента изделие не было восстановлено:

$$\mu(t) = \frac{a_B(t)}{1-S(t)}. \quad (1.19)$$

При $\mu(t)=const$ мы имеем экспоненциальное распределение времени восстановления:

$$S(t) = 1 - e^{-\mu t}. \quad (1.20)$$

Для определения величины $\mu(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\mu(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{HB,CP} \Delta t}, \quad (1.21)$$

где $N_{HB,CP}$ – среднее число изделий, не восстановленных на отрезке времени $[t-\Delta t/2, t+\Delta t/2]$.

9. Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления:

$$\Theta = \int_0^{\infty} t a_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1-S(t)] dt. \quad (1.22)$$

Для определения величины Θ используется следующая статистическая оценка:

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^{N_{OB}} t_{iB}}{N_{OB}}, \quad (1.23)$$

где t_{iB} – время восстановления i -го изделия.

10. Параметр потока отказов $\omega(t)$ – математическое ожидание числа отказов, происшедших в единицу времени к моменту времени t . Для определения величины $\omega(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\omega(t) = \frac{n_1(\Delta t)}{N_o \Delta t}, \quad (1.24)$$

где $n_1(\Delta t)$ - число изделий, отказавших на отрезке времени $[t-\Delta t/2, t+\Delta t/2]$, при условии, что отказавшее изделие немедленно заменяется новым (в этом заключается основное отличие параметра потока отказов от частоты отказов, при расчете которой замена отказавших элементов новыми на предполагается). При экспоненциальном распределении времени безотказной работы выполняется равенство

$$\omega(t) = \lambda = \frac{1}{T_{cp}}. \quad (1.25)$$

11. **Функция готовности** $K_r(t)$ представляет собой вероятность того, что в момент времени t объект будет работоспособным. Для определения величины $K_r(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$K_r(t) = \frac{N(t)}{N_o}, \quad (1.26)$$

где N_o – общее число изделий; $N(t)$ – число изделий, работоспособных к моменту времени t . В отличие от вероятности безотказной работы, определяемой похожим образом (соотношение 1.2), функция готовности учитывает время восстановления изделий, отказавших на отрезке времени $[0, t]$.

12. **Коэффициент готовности** K_r характеризует вероятность того, что объект будет работоспособен в произвольный момент времени:

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t). \quad (1.27)$$

Для определения величины K_r отдельного изделия используется следующая статистическая оценка:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{vi}}, \quad (1.28)$$

где t_{pi} – i -й интервал времени безотказной работы изделия, t_{vi} – i -й интервал времени восстановления; n – число отказов.

13. **Коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект будет работоспособен в произвольный момент времени t и безотказно проработает в течение заданного времени τ :

$$R(t, \tau) = K_r(t)P(\tau). \quad (1.29)$$

Для определения величины $R(t, \tau)$ используется следующая статистическая оценка:

$$R(t, \tau) = \frac{N_t(\tau)}{N_o}, \quad (1.30)$$

где $N_t(\tau)$ – число изделий, работоспособных к моменту времени t и исправно проработавших в течение времени τ .

14. **Коэффициент технического использования** $K_{и}$ – доля времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии в некотором цикле $T_{ц}$, представленном в виде суммы:

- t_p – времени, в течение которого объект работоспособен;
- t_b – времени, затраченного на восстановление объекта после отказов;
- $t_{п}$ – времени, затраченного на проведение профилактики;
- t_k – времени, затраченного на проведение контроля;

$$K_{и} = \frac{t_p}{t_p + t_b + t_{п} + t_k}. \quad (1.31)$$

Основной характеристикой резервирования является **кратность резервирования**, которая представляет собой отношение числа резервных элементов в системе к числу основных:

$$k = \frac{N_{рез}}{N_{осн}}. \quad (1.32)$$

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Характер распределения случайных величин при описании надежности тех или иных объектов точно известным бывает относительно редко. Но, в то же время, на основании опыта эксплуатации объектов, априорных умозаключений и допущений можно делать качественные выводы о характере такого распределения. Так, большинство объектов в природе и в технике подвержены старению. Это означает, что с течением времени характеристики надежности таких объектов ухудшаются. Такие объекты и соответствующие им распределения называются «стареющими». Гораздо реже встречаются объекты, показатели надежности которых со временем улучшаются. Такие объекты и соответствующие им распределения называются «молодеющими». Старение или омолаживание объектов проявляется во временных зависимостях таких показателей надежности, как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Имея экспериментальные временные зависимости этих величин, можно подобрать подходящее распределение из типового набора.

1. Самым распространенным случаем является **экспоненциальное распределение**, характеризуемое постоянством интенсивности отказов λ во времени:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad a(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad T_{ср} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.1)$$

Графики, характеризующие экспоненциальное распределение, представлены на рис.2.1.

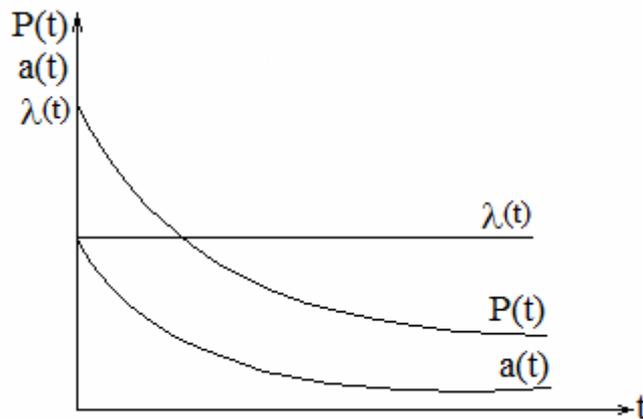


Рис.2.1. Графики основных характеристик надежности при экспоненциальном распределении

Если $\lambda t \ll 1$, то $P(t) \approx 1 - \lambda t = 1 - t/T_{cp}$. Важным свойством экспоненциального распределения является то, что вероятность безотказной работы в интервале времени $[t, t+\tau]$ не зависит от времени предшествующей работы t , а зависит только от длины интервала τ .

2. **Распределение Рэлея** во многих случаях хорошо описывает поведение во времени объектов с переменной интенсивностью отказов. Здесь принимается, что интенсивность отказов линейно зависит от времени:

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{t}{\sigma^2}; & P(t) &= \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right); \\ a(t) &= \frac{t}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right); & T_{cp} &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma, \end{aligned} \right\} (2.2)$$

где σ - параметр распределения Рэлея. Графики, характеризующие распределение Рэлея, представлены на рис. 2.2. Как видно из рисунка, данное распределение можно использовать при описании характеристик надежности стареющих объектов.

3. **Распределение Вейбулла** является более общим случаем по отношению к двум предыдущим. Распределение Вейбулла позволяет описывать поведение во

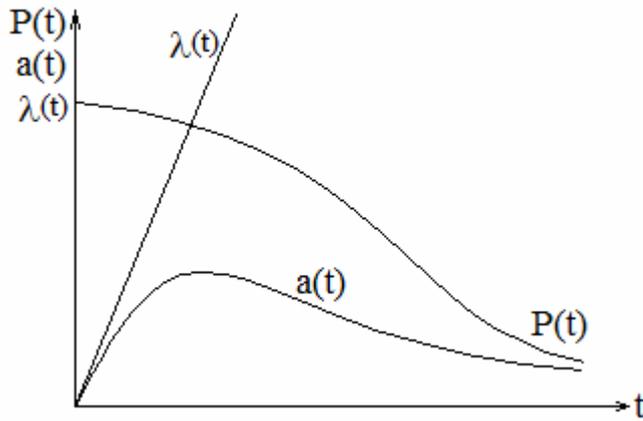


Рис.2.2. Графики основных характеристик надежности для распределения Рэлея

времени характеристик надежности как стареющих, так и молодеющих объектов. Это распределение является двухпараметрическим. Параметр A распределения описывает его масштаб, а параметр k – асимметрию и эксцесс. При $k=1$ распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное, а при $k=2$ – в распределение Рэлея.

Основные характеристики надежности выражаются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= Akt^{k-1}; & P(t) &= \exp(-At^k); \\ a(t) &= Akt^{k-1} \exp(-At^k); & T_{cp} &= \frac{\Gamma(\frac{1}{k}+1)}{A^{\frac{1}{k}}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция. Графики основных характеристик надежности для распределения Вейбулла приведены на рис.2.3.

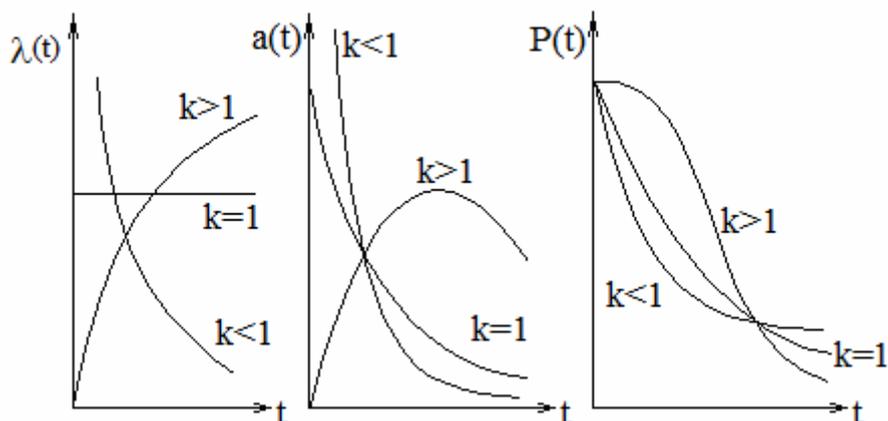


Рис.2.3. Графики основных характеристик надежности для распределения Вейбулла

3. **Нормальное распределение** хорошо описывает поведение характеристик надежности стареющих объектов. Оно успешно применяется для большинства объектов с постепенным характером отказов. Если дисперсия среднего времени наработки на отказ намного меньше абсолютного значения T_{cp} , то из распределения Гаусса имеем:

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}\right]; \\ P(t) &= 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где T_1 и σ - параметры нормального распределения. Если же неравенство $T_1 \gg \sigma$ не соблюдается, то следует использовать усеченное нормальное распределение с частотой отказов

$$a(t) = C \rho(t), \quad (2.4)$$

где $\rho(t)$ – функция распределения Гаусса; C – константа усечения, определяемая из условия нормировки

$$\int_0^{\infty} a(t) dt = 1. \quad (2.5)$$

Графики основных характеристик надежности для нормального распределения приведены на рис.2.4.

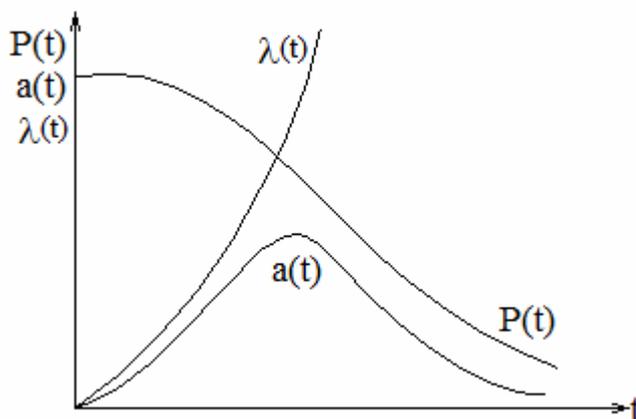


Рис.2.4. Основные характеристики надежности для нормального распределения

Довольно часто для описания характеристик надежности используются **суперпозиции** двух распределений. Например, для двух экспоненциальных распределений можно положить:

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} ; \\ P(t) &= c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} , \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где c_1 и c_2 – веса суперпозиции, причем $c_1 + c_2 = 1$. После подстановки соотношений (1.7) и (1.10) в (2.5) получим:

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}} ; \\ T_{\text{ср}} &= \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} . \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ В СИСТЕМАХ БЕЗ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Для практических целей расчет характеристик надежности в большинстве случаев проводят приближенными методами. Исходными данными для расчета являются:

- принципиальная схема системы;
- сведения о режимах работы всех элементов;
- значения интенсивностей отказов всех элементов;
- абсолютные величины и дисперсии среднего времени наработки на отказ для элементов, подверженных постепенным отказам.

Целью расчетов, как правило, является оценка вероятности безотказной работы системы за какой-либо промежуток времени или оценка среднего времени наработки системы на отказ.

В общем случае расчет надежности системы проводят в несколько этапов.

На **первом** этапе рассматриваемую систему разделяют на отдельные элементы. Степень детализации структуры при этом определяется наличием достоверных сведений о характеристиках элементов. Например, типовой вторичный показывающий и регистрирующий прибор (серии КС или КВ) можно рассматривать как совокупность измерительной схемы, электронного усилителя, реверсивного двигателя и передаточного механизма. Если известны значения интенсивностей отказов (или других эквивалентных показателей надежности) всех этих элементов, то нет нужды в дальнейшей детализации системы. Если же характеристики надежности какого-либо элемента неизвестны, то следует провести его декомпозицию на более простые составляющие, характеристики

надежности которых имеются в справочной литературе или в нормативных документах заводов-изготовителей.

На **втором** этапе формулируются понятия отказа для отдельных элементов и системы в целом. Первоначально эти понятия формулируются для внезапных отказов. Так, например, внезапные отказы элементов электронных систем могут происходить вследствие обрывов или коротких замыканий. В обоих случаях происходит скачкообразное изменение свойств элемента, которое рассматривается как отказ. Затем формулируется понятие постепенного отказа. Для этого определяются предельные значения параметров элементов, при достижении которых элементы считаются отказавшими. Для системы в целом понятие отказа включает в себя потерю устойчивости или осуществление функций регулирования и управления с ненадлежащим качеством.

На **третьем** этапе составляется логическая схема расчета надежности. Такая схема, как правило, отличается от принципиальной схемы рассматриваемой системы. Если в системе отсутствуют избыточные элементы и отказ любого элемента приводит к отказу системы в целом, то соединение всех элементов в логической схеме можно рассматривать, как последовательное независимо от действительных способов соединения элементов. Поэтому последовательное соединение элементов в логических схемах расчета надежности считается **основным**.

На **четвертом** этапе осуществляется определение характеристик надежности всех групп элементов, имеющих основное соединение. Расчет характеристик надежности производится отдельно по внезапным и постепенным отказам и отдельно для восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов. Методика расчетов конкретных характеристик надежности будет рассмотрена ниже.

На **пятом** этапе определяют характеристики восстановления для групп восстанавливаемых элементов, имеющих основное соединение.

3.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ПО ВНЕЗАПНЫМ ОТКАЗАМ

Рассмотрим систему, состоящую из N элементов, имеющих основное соединение. Отказ в системе происходит при отказе любого элемента, следовательно вероятность безотказной работы вычисляется как:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (3.1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента. При определении характеристик надежности по внезапным отказам принимают допущение об экспоненциальном распределении времени безотказной работы. Тогда

$$\left. \begin{aligned} P_i(t) &= e^{-\lambda_i t}; \\ P(t) &= \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t} = \exp\left(-t \sum_{i=1}^N \lambda_i\right). \end{aligned} \right\} (3.2)$$

Суммарная интенсивность отказов и среднее время наработки системы на отказ, соответственно, равны:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^N \lambda_i; \\ T_{\text{ср}} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}. \end{aligned} \right\} (3.3)$$

Таким образом, зная интенсивности отказа всех элементов системы можно легко определить ее характеристики надежности. Основная проблема здесь заключается в том, чтобы найти достоверные значения интенсивностей отказов элементов. Эти значения могут быть взяты из справочной литературы как среднегрупповые интенсивности отказов (усредненные данные производителей элементов), либо могут быть вычислены коэффициентным методом.

Среднегрупповые интенсивности отказов наиболее часто встречающихся элементов приведены в табл.3.1. Поскольку данные различных производителей по характеристикам надежности элементов зачастую противоречивы, в табл.3.1 приведены интервальные оценки среднегрупповых интенсивностей отказов. В соответствии с этим оценки характеристик надежности систем также будут носить интервальный характер. Кроме того, во многих случаях необходимо учитывать реальные условия эксплуатации системы, которые могут отличаться от номинальных. Влияние режимов работы элементов на их характеристики надежности учитывается с помощью коэффициентов нагрузки, под которыми понимают отношение рабочего значения нагрузки к некоторому номинальному значению. Наиболее часто учитывают три вида нагрузки – электрическую, тепловую и вибрационную.

Коэффициент электрической нагрузки определяется как отношение рабочего значения некоторого электрического параметра (рассеиваемой мощности, напряжения или тока) к номинальному (указанному в нормативно-технической документации):

$$K_{\text{э}} = \frac{U_{\text{р}}}{U_{\text{н}}}. \quad (3.4)$$

Таблица 3.1

Среднегрупповые интенсивности отказов некоторых элементов

Элементы	$\lambda_{oi \min} 10^6, 1/\text{ч}$	$\lambda_{oi \max} 10^6, 1/\text{ч}$
Электровакуумные приборы	1,0	3,45
Резисторы	0,02	0,4
Конденсаторы	0,01	0,17
Трансформаторы	0,02	0,64
Катушки индуктивности	0,02	0,44
Электромагнитные реле	0,05	1,01
Электродвигатели	1,0	3,3
Полупроводниковые диоды	0,05	0,5
Транзисторы	0,4	1,0
Интегральные микросхемы	0,1	1,0
Штепсельные разъемы	0,01	0,09

Коэффициент тепловой нагрузки рассчитывают как отношение разности между номинальной и рабочей температурами к номинальной температуре, за которую обычно принимают 25°C:

$$K_t = \frac{t_p - t_H}{t_H}. \quad (3.5)$$

Коэффициент вибрационной нагрузки вычисляют как отношение действующего вибрационного ускорения к ускорению силы тяжести:

$$K_B = \frac{a_d}{9,81}. \quad (3.6)$$

Следует также учитывать, что различные элементы по-разному меняют свои характеристики надежности в зависимости от нагрузки.

При описании зависимостей интенсивности отказов от режимов работы вводят поправочные коэффициенты h , значения которых приведены в табл.3.2.

Итоговые значения интенсивностей отказов элементов вычисляются как

$$\lambda_i = \lambda_{oi} \left[1 + \sum_{i=1}^N h_i K_{hi} \right], \quad (3.7)$$

где λ_{oi} -интенсивность отказов элемента (из табл. 3.1), K_{hi} – i -й коэффициент нагрузки и h_i – соответствующий поправочный коэффициент.

Таблица 3.2

Поправочные коэффициенты для различных видов нагрузки

Элементы	Поправочные коэффициенты h		
	Электрич. нагрузка	Тепловая нагрузка	Вибрац. нагрузка
Электривакуумные приборы	1,5 – 2,0	1,1 – 1,5	1,25
Резисторы	1,2 – 2,0	0,3 – 0,8	0,3
Конденсаторы бумажные	2,5 – 4,0	1,2 – 1,6	–
Конденсаторы слюдяные	–	0,8 – 1,1	–
Конденсаторы керамические	3,0	0,5 – 0,8	0,3
Конденсаторы электролитич.	0,5 – 0,7	0,5 – 0,6	–
Трансформаторы	3,3	1,1	–
Электромагнитные реле	2,3	–	0,8
Электродвигатели	0,3 – 0,4	0,2 – 0,5	–
Диоды германиевые	0,4	0,3 – 0,6	0,5
Диоды кремниевые	–	0,2 – 0,6	–
Транзисторы германиевые	1,2 – 1,4	0,9 – 1,5	0,8
Транзисторы кремниевые	0,5	0,3 – 0,5	–
Интегральные микросхемы	0,5	0,5	–
Штепсельные разъемы	0,8	–	1,3

Альтернативным методом определения интенсивностей отказов элементов является коэффициентный метод, который применяется при недостатке сведений о характеристиках надежности элементов. В основу метода положено допущение о том, что интенсивности отказов всех элементов меняются в одинаковой степени в зависимости от условий эксплуатации. Таким образом, интенсивности отказов элементов могут быть вычислены как

$$\lambda_i = \lambda_0 K_i, \quad (3.8)$$

где λ_0 – интенсивность отказов базового элемента (обычно, резистора) и K_i – коэффициент надежности i – го элемента. Значения коэффициентов надежности наиболее распространенных элементов приведены в табл. 3.3.

В соответствии с коэффициентным методом расчета суммарная интенсивность отказов в системе вычисляется как

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0 \sum_{i=1}^N n_i K_i, \quad (3.9)$$

где λ_0 – средняя интенсивность отказов резистора, n_i – число элементов i -го типа в системе и K_i – коэффициент надежности для элемента i -го типа. Последующие вычисления проводятся по уравнениям (3.2) и (3.3).

$$\left. \begin{aligned}
 P(t) &= \prod_{i=1}^N [0,5 - \Phi(z_i)], \\
 \Phi(z_i) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_i} e^{-\frac{x^2}{2}} dx ; \quad z_i = \frac{t - T_i}{\sigma_i},
 \end{aligned} \right\} (3.11)$$

где T_i – среднее время отклонения i – го параметра выше критического значения;
 σ_i – среднеквадратичное отклонение i – го параметра;
 N – число параметров, определяющих работоспособность системы.

Для восстанавливаемых изделий с достаточно хорошим приближением можно принять, что время безотказной работы распределено, как и для внезапных отказов, по экспоненциальному закону, тогда

$$P(t) = e^{-\lambda_{\text{по}} t}, \quad (3.12)$$

где $\lambda_{\text{по}}$ – эквивалентная интенсивность постепенных отказов, равная интенсивности выхода за установленные границы некоторого определяющего параметра. Оценка эквивалентной интенсивности постепенных отказов для интегральных схем иногда представляет определенные трудности из-за отсутствия сведений о влиянии числа элементов схемы на характеристики надежности. На основании опытных данных обычно принимают, что число постепенных отказов составляет около 15% от общего числа отказов.

4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Резервирование – метод повышения надежности путем введения в систему дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых для выполнения системой заданных функций. По характеру вводимых избыточных средств различают структурное, информационное и временное резервирование.

При структурном резервировании в систему вводятся дополнительные элементы, узлы или устройства, которые принимают на себя функции основных элементов при их отказе.

Информационное резервирование предполагает использование в системе избыточной информации. Типичными примерами такого резервирования являются многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи и использование для обмена информацией самокорректирующихся кодов.

Временное резервирование предусматривает отведение на выполнение заданных функций большего времени, чем это необходимо. Кроме того, предполагается возможность возобновления функционирования системы, прерванного в результате отказа.

Перечисленные виды резервирования могут применяться к системе в целом или к отдельным ее элементам. В первом случае резервирование называют общим, а во втором – раздельным. На данном этапе развития техники и технологии

наиболее часто применяется структурное резервирование, поэтому дальнейшую классификацию методов резервирования рассмотрим именно для этого типа.

По схеме включения резервных элементов различают постоянное резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование. При постоянном резервировании резервные элементы установлены в систему наравне с основными. В случае отказа основного элемента резервный вводится в действие без применения каких-либо дополнительных устройств.

При резервировании замещением резервные элементы устанавливаются в систему только после отказа основных. Данный способ требует применения контролирующих и переключающих устройств, которые устанавливают факт отказа основного элемента и подключают вместо него резервный.

Скользящее резервирование – это резервирование замещением при котором группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент.

По режимам работы основных и резервных элементов различают нагруженное, облегченное и ненагруженное резервирование. При нагруженном резервировании основные и резервные элементы работают в одинаковых условиях. Принимается, что характеристики надежности основных и резервных элементов в любой момент времени одинаковы. Облегченное резервирование предполагает работу резервных элементов в более мягких условиях по сравнению с основными. При этом принимается, что, будучи в резерве, элементы имеют лучшие характеристики надежности, чем в период работы в качестве основных.

При ненагруженном резервировании резервные элементы, в отличие от основных, бездействуют. Здесь принимается, что элементы, находящиеся в резерве, не отказывают, то есть обладают идеальной надежностью.

Степень избыточности характеризуется кратностью резервирования. Под кратностью резервирования понимают отношение числа резервных элементов к числу основных. Здесь различают резервирование с целой и дробной кратностью. Резервирование с целой кратностью имеет место, когда один основной элемент резервируется одним или более резервными элементами. При резервировании с дробной кратностью два или более основных элемента резервируются одним или более резервными элементами. Чаще всего число основных элементов превышает число резервных.

Расчетно-логической схемой резервированной системы в большинстве случаев является схема с параллельно-последовательным соединением элементов. В цепочке последовательно соединенных элементов отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу цепочки в целом. В резервированной группе параллельно соединенных элементов допускается выход из строя определенного числа элементов без потери работоспособности группы в целом. На рис. 4.1 представлены расчетно-логические схемы различных видов структурного резервирования.

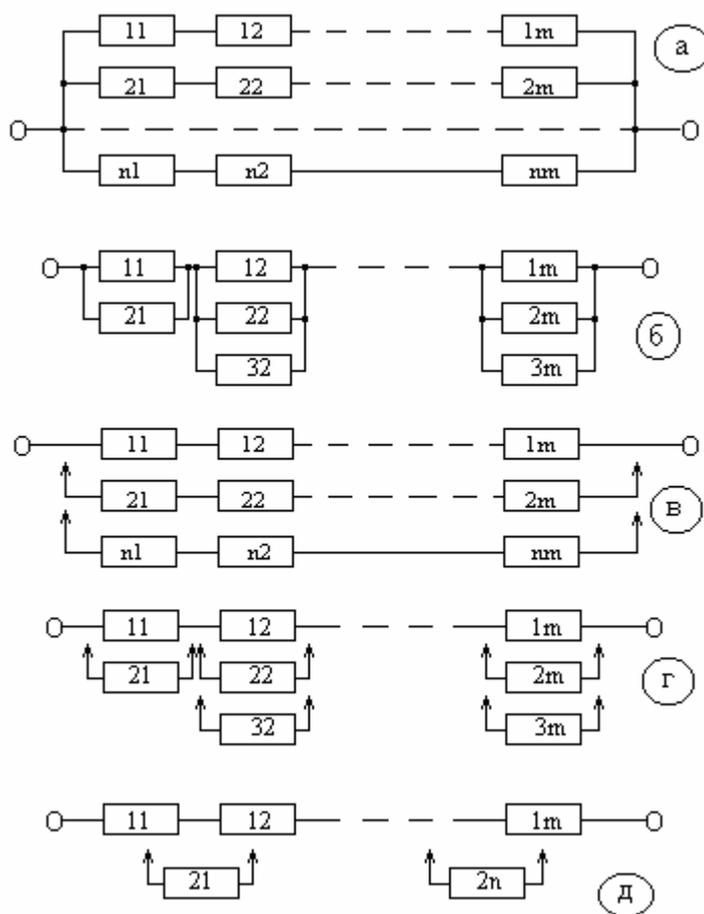


Рис.4.1. Расчетно-логические схемы структурного резервирования:
а – общее постоянное резервирование; б – раздельное постоянное резервирование; в - общее резервирование замещением; г – раздельное резервирование замещением; д – скользящее резервирование с дробной кратностью

4.1. ПОСТОЯННОЕ НАГРУЖЕННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Расчетно-логическая схема постоянного нагруженного резервирования представлена на рис. 4.2 а. Такая схема соответствует случаю, когда один основной элемент резервируется $n-1$ резервными элементами. Резервированная группа обладает работоспособностью если работоспособен хотя бы один из n элементов. Основные и резервные элементы включаются в работу одновременно, но в каждый момент времени используется лишь один элемент. Режимы работы основных и резервных элементов одинаковы.

В случае отказа основного элемента его функции начинает выполнять один из резервных элементов. Введем допущения о равной надежности всех элементов и о постоянстве интенсивности отказов во времени. Случайный процесс функционирования резервированной группы можно изобразить в виде схемы, представленной на рис. 4.3.

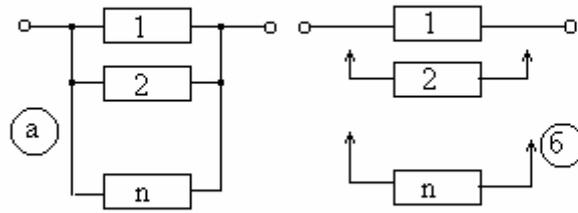


Рис.4.2. Расчетно-логические схемы резервированной группы:
 а – нагруженное постоянное резервирование;
 б – ненагруженное резервирование и резервирование замещением

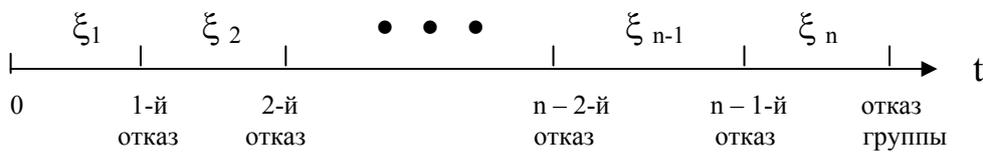


Рис.4.3. Случайный процесс функционирования резервированной группы

Первый отказ одного из элементов группы наступит через случайное время ξ_1 . В течение этого времени группа работает в полном составе, следовательно, случайная величина ξ_1 распределена по экспоненциальному закону с интенсивностью $n\lambda$ (λ - интенсивность отказов одного элемента). Вторым отказом наступит через случайное время ξ_2 после первого отказа. В течение промежутка времени ξ_2 число работающих элементов в группе равно $n-1$ и случайная величина ξ_2 распределена по экспоненциальному закону с интенсивностью $(n-1)\lambda$. Проведя аналогичные рассуждения для всех случайных промежутков времени ξ_i , можно заключить, что математическое ожидание величины ξ_i определяется соотношением

$$M\{\xi_i\} = \frac{1}{(n-i-1)\lambda}. \quad (4.1)$$

Отказ группы в целом наступит после отказа последнего n – го элемента через случайное время τ .

$$\tau = \sum_{i=1}^n \xi_i. \quad (4.2)$$

Среднее время наработки на отказ определяется как математическое ожидание случайной величины τ :

$$T = M\{\tau\} = M\left\{\sum_{i=1}^n \xi_i\right\} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-i+1)\lambda}. \quad (4.3)$$

Таким образом, среднее время наработки на отказ в резервированной группе увеличивается в $\sum_{i=1}^n \frac{1}{(n-i+1)}$ раз по сравнению с индивидуальным элементом:

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-i+1} = T_э \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-i+1}. \quad (4.4)$$

Определим вероятность безотказной работы резервированной группы с постоянным нагруженным резервированием. Пусть вероятность безотказной работы одного элемента описывается функцией времени $P_э(t)$. Тогда вероятность отказа элемента можно определить, как $Q_э(t) = 1 - P_э(t)$ и вероятность отказа группы:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_{эi}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_{эi}(t)]. \quad (4.5)$$

Вероятность безотказной работы группы в целом вычисляется из соотношения:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_{эi}(t)] \quad (4.6)$$

или для равнонадежных элементов:

$$P(t) = 1 - [1 - P_э(t)]^n. \quad (4.7)$$

4.2. НЕНАГРУЖЕННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ. ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЗЕРВА ЗАМЕЩЕНИЕМ

Расчетно-логическая схема ненагруженного резервирования при включении резерва замещением представлена на рис.4.2 б. Резервированная группа состоит из одного основного элемента и $n - 1$ элементов, находящихся в ненагруженном резерве. При этом полагают, что резервные элементы абсолютно надежны и отказывать не могут. Кроме того, будем считать элементы равнонадежными с постоянной интенсивностью отказов λ . Процесс функционирования такой резервированной группы можно представить диаграммой на рис.4.3. Основное отличие от нагруженного резервирования в данном случае заключается в том, что резервный элемент, включенный в работу после i - го отказа, до этого момента не работал. Таким образом, математическое ожидание всех случайных промежутков времени ξ_i одинаково и равно:

$$M\{\xi_i\} = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.8)$$

Тогда среднее время наработки на отказ резервированной группы можно записать как:

$$T = \sum_{i=1}^n M\{\xi_i\} = \frac{n}{\lambda} = nT_э, \quad (4.9)$$

где $T_э$ – среднее время наработки на отказ индивидуального элемента. Определим теперь вероятность безотказной работы резервированной группы. Вероятность того, что элемент с интенсивностью отказов λ откажет за время t ровно i раз (с учетом замены отказавших элементов резервными) определяется по закону Пуассона:

$$P\{k=i\} = \frac{(\lambda t)^i}{i!} \exp(-\lambda t). \quad (4.10)$$

Вероятность безотказной работы резервированной группы рассчитывается как сумма вероятностей (4.10) для всех элементов:

$$P(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \exp(-\lambda t). \quad (4.11)$$

В случае дублирования

$$P(t) = (1 + \lambda t) \exp(-\lambda t). \quad (4.12)$$

4.3. НАГРУЖЕННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ С ДРОБНОЙ КРАТНОСТЬЮ

Расчетно-логическая схема такой резервированной группы приведена на рис.4.4. Резервированная группа состоит из m основных однотипных элементов

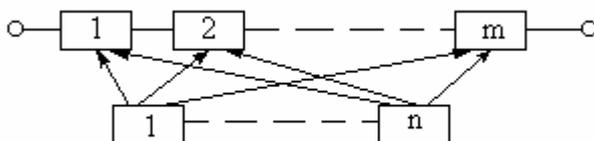


Рис.4.4. Расчетно-логическая схема резервирования с дробной кратностью

и n элементов нагруженного резерва ($m > n$). При отказе основного элемента его функции начинает выполнять один из резервных. Работоспособность резервированной группы сохраняется при отказе не более n основных элементов. Среднее время наработки на отказ в данном случае находится из соотношения:

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right) =$$

$$= T_{\text{э}} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right), \quad (4.13)$$

где λ и $T_{\text{э}}$ – соответственно, интенсивность отказов и среднее время наработки на отказ индивидуального элемента. Вероятность безотказной работы резервированной группы будет определяться вероятностями событий – i элементов отказали, $m+n-i$ элементов работоспособны. Число различных вариантов таких событий равно:

$$C_{m+n}^i = \frac{(m+n)!}{i!(m+n-i)!}. \quad (4.14)$$

Вероятность одного из таких событий определяется как

$$P(i, t) = [1 - P_{\text{э}}(t)] [P_{\text{э}}(t)]^{m+n-i}, \quad (4.15)$$

где $P_{\text{э}}(t)$ – вероятность безотказной работы индивидуального элемента. Таким образом, вероятность безотказной работы резервированной группы определяется как:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i P(i, t) =$$

$$= \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i [1 - P_{\text{э}}(t)] [P_{\text{э}}(t)]^{m+n-i}. \quad (4.16)$$

4.4. НЕНАГРУЖЕННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ С ДРОБНОЙ КРАТНОСТЬЮ

Расчетно-логическая схема для такой резервированной группы приведена на рис.4.4. Группа состоит из m основных элементов и n элементов ненагруженного резерва. Отличие данного варианта резервирования от предыдущего только в том, что резервные элементы не работают, следовательно, не могут отказывать. Исходя из того, что в группе постоянно работают m элементов с интенсивностью отказов λ и работоспособность группы сохраняется до $n+1$ – го отказа, можно определить среднее время наработки на отказ, как:

$$T = \frac{n+1}{m\lambda} = \frac{n+1}{m} T_{\text{э}}, \quad (4.17)$$

где $T_{\text{э}}$ – среднее время наработки на отказ индивидуального элемента. Вероятность безотказной работы резервированной группы определяется, согласно (4.11), как:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n \frac{(m\lambda t)^i}{i!} \exp(-m\lambda t). \quad (4.18)$$

4.5. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ИНФОРМАЦИОННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

В системах, использующих цифровую управляющую и вычислительную технику возможна организация резервирования путем введения информационной избыточности. Принцип информационного резервирования заключается в том, что ошибки, возникающие при передаче или приеме информации и приводящие к сбоям или отказам системы, могут быть обнаружены и исправлены с использованием избыточной информации, содержащейся в передаваемых (принимаемых) сообщениях. Цифровые коды, содержащие избыточную информацию, называют *самокорректирующимися*. Принцип построения n -разрядного самокорректирующегося кода можно продемонстрировать на геометрической модели кода, представляющей собой n -мерный многогранник, в вершинах которого находятся кодовые комбинации, а длина ребра равна единице. Геометрическая модель трехразрядного двоичного кода приведена на рис.4.5.

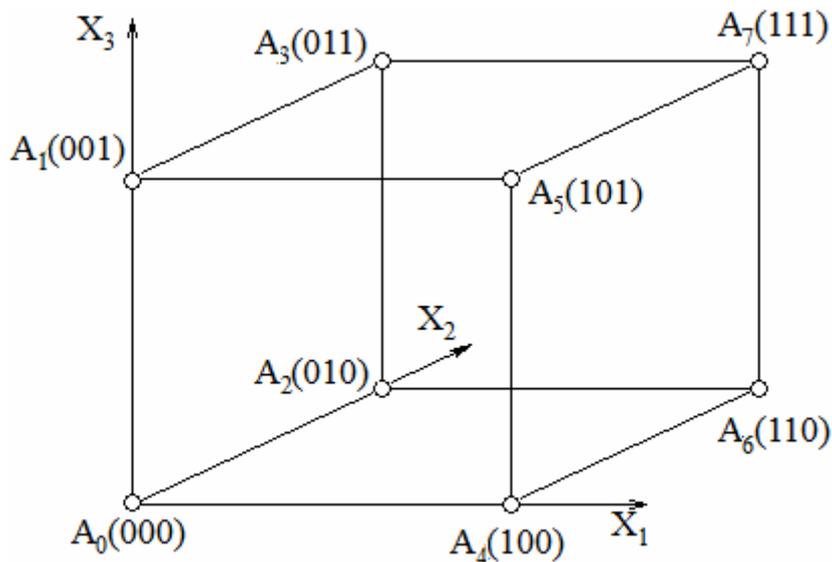


Рис.4.5. Геометрическая модель трехразрядного двоичного кода

Основным параметром данной модели является кодовое расстояние d , равное минимальному количеству ребер между двумя различными кодовыми комбинациями. В двоичном коде без информационной избыточности $d=1$ и все кодовые комбинации являются «разрешенными». Такой код не позволяет ни обнаружить, ни, тем более, исправить возможные ошибки передачи или приема. Информационная избыточность вводится в цифровой код путем увеличения кодо-

вого расстояния. При $d=2$ «разрешенными» остаются только четыре кодовые комбинации из восьми, например, 000, 011, 110 и 101. Прием одной из «запрещенных» кодовых комбинаций, например, 001, будет свидетельствовать о том, что при передаче (приеме) данных произошла ошибка и поступившие данные следует игнорировать. Однако при $d=2$ еще нет возможности исправлять обнаруженные ошибки. Такая возможность появляется при $d=3$. В этом случае «разрешенными» остаются только две кодовые комбинации из восьми, например, 000 и 111. В ходе эксплуатации систем передачи данных установлено, что наиболее вероятными являются ошибки в одном разряде передаваемых (принимаемых) сообщений. Этот факт позволяет исправлять обнаруженные ошибки: при приеме кодовой комбинации 001 последний разряд может быть исправлен для получения «разрешенной» кодовой комбинации 000. В общем случае корректирующая способность кода определяется выражением:

$$d = r + s + 1, \quad (4.19)$$

где r – число обнаруживаемых; s – число исправляемых ошибок при $r \geq s$.

При анализе надежности систем с информационной избыточностью пользуются, в основном, приближенным методом, согласно которому в системе выделяют две составляющие (рис.4.5, а)

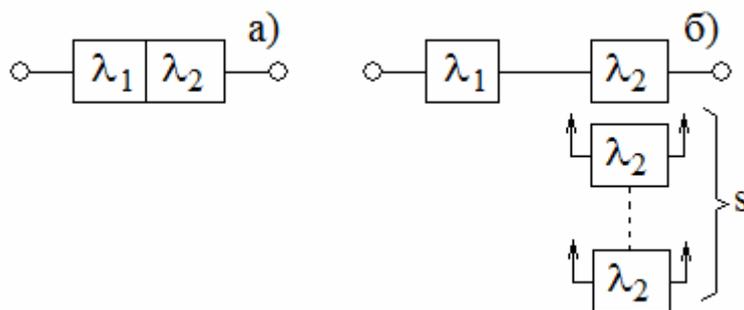


Рис.4.5. Приближенная оценка надежности системы с информационным резервированием

Составляющая с интенсивностью отказов λ_1 является незащищенной, а составляющая с интенсивностью отказов λ_2 защищена самокорректирующимся кодом с возможностью одновременного исправления s ошибок. Для безотказной работы системы в течение времени t необходимо, чтобы в незащищенной части системы за это время не возникло ни одной ошибки, а в защищенной части число ошибок не превысило бы s . Согласно соотношениям (2.1) и (4.11) вероятность безотказной работы системы будет равна:

$$P(t) = \exp(-\lambda_1 t) \sum_{i=0}^s \frac{(\lambda_2 t)^i}{i!} \exp(-\lambda_2 t). \quad (4.20)$$

Из соотношения (4.20) следует, что данная система эквивалентна последовательному соединению незащищенной части с s -кратно резервированной защищенной частью и абсолютно надежным переключателем (рис.4.5, б).

4.6. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ВРЕМЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

При наличии временной избыточности на выполнение системой какой-либо функции отводится время, заведомо большее, чем это необходимо. Возможны два варианта использования избыточного времени:

- 1) объем работы, выполненной до наступления отказа, обесценивается, и выполнение функции необходимо начинать сначала;
- 2) работа, выполненная до наступления отказа, не обесценивается, и выполнение заданной функции начинается при состоянии системы непосредственно перед возникновением отказа.

Рассмотрим первый вариант. При возникновении отказа вся предыдущая работа по выполнению заданной функции обесценивается и выполняется с самого начала. Обозначим время, необходимое для выполнения заданной функции при отсутствии отказов – v и время, отведенное системе для выполнения работы объемом v – t , причем интервал v укладывается на промежутке времени t целое число раз $n=t/v$. Вероятность выполнения работы объемом v за время t обозначим $P(t,v)$. Примем допущение, что после отказа система мгновенно восстанавливается, и таких отказов на промежутке времени t может быть не более $n-1$. Таким образом, допускается $n-1$ цикл выполнения заданной функции с начала и вероятность безотказной работы системы в i -м цикле будет равна:

$$P_i = [1-p(v)]^i p(v), \quad i=0 \dots n-1 \quad (4.21)$$

где $p(v)$ – вероятность безотказной работы системы за время v . При различных значениях i величина P_i характеризует вероятности несовместных событий, поэтому можно заключить:

$$P(t,v) = \sum_{i=0}^{n-1} [1-p(v)]^i p(v) \quad \text{или} \\ P(t,v) = 1 - [1-p(v)]^n. \quad (4.22)$$

Среднее время выполнения работы объемом v на промежутке времени t $T_{t,v}$ можно определить как математическое ожидание случайного времени выполнения работы заданного объема

$$T_{t,v} = \sum_{i=0}^{n-1} (i+1)vp(v)[1-p(v)]^i \quad \text{или} \\ T_{t,v} = v \frac{1 - [1+np(v)][1-p(v)]^n}{p(v)}.$$

5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы за 5000 часов, если к этому моменту времени из 250 объектов, взятых для испытаний, отказали 23.
2. Построить временные зависимости частоты и интенсивности отказов по результатам испытаний на надежность (табл.5.1), если на испытания было поставлено $N_0 = 500$ изделий.

Таблица 5.1

t час	0	100	200	300	400	500
n(t)*	0	2	8	20	35	60

* n(t) – число изделий, отказавших к моменту времени t.

3. Определить среднее время наработки на отказ по результатам испытаний на надежность (табл.5.1).

Построить временные зависимости вероятности, частоты и интенсивности восстановления по данным табл.5.2, если в момент $t=0$ на восстановление было поставлено $N_{ОВ} = 200$ изделий.

Таблица 5.2

t час	0	5	10	15	20	25
$N_B(t)^*$	0	75	100	120	135	145

* $N_B(t)$ – число изделий, восстановленных к моменту времени t.

4. Определить среднее время восстановления по данным табл. 5.2.
5. Вычислить коэффициент готовности объекта по данным табл.5.3, отражающим историю функционирования объекта.

t_p – время исправной работы объекта до очередного отказа;

t_B – время восстановления объекта после очередного отказа.

Таблица 5.3

Номер отказа	1	2	3	4	5	6
t_p час	450	150	230	470	650	375
t_B час	2	6	10	8	15	45

6. Определить основные характеристики надежности – вероятность отказа $Q(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $a(t)$, на момент времени $t=500$ часов, а также интенсивность отказов λ и среднее время наработки на отказ T_{CP} , если справедлив экспоненциальный закон надежности и к моменту времени $t=250$ часов из 550 объектов, взятых для испытаний, отказали 27 объектов.
7. Определить основные характеристики надежности – вероятность отказа $Q(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $a(t)$, на момент времени $t=1000$ часов, а также среднее время наработки на отказ T_{CP} , если справедлив экспоненциальный закон надежности и интенсивность отказов составляет $3,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час.
8. Определить параметр распределения Рэлея σ и основные характеристики надежности – $P(t)$, $Q(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ на момент $t = 1000$ часов, а также T_{CP} , если к этому моменту из 750 объектов, взятых для испытаний, отказали 25.
9. Определить основные характеристики надежности – вероятность отказа $Q(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $a(t)$, на момент времени $t=1500$ часов, а также среднее время наработки на отказ T_{CP} , если характеристики надежности подчиняются распределению Рэлея с параметром $\sigma=12500$ час.
10. Определить параметры A и k распределения Вейбулла, а также интенсивность отказов $\lambda(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ на момент времени $t = 2000$ часов, если из 750 изделий, взятых для испытаний, через 1000 часов отказали 50, а через 2500 часов – 180 изделий.
11. Определить основные характеристики надежности – вероятность отказа $Q(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $a(t)$, на момент времени $t=500$ часов, а также интенсивность отказов λ , если характеристики надежности подчиняются распределению Вейбулла с параметрами $A=1,5 \cdot 10^{-4}$ и $k=0,8$.
12. Вычислить коэффициенты суперпозиции двух экспоненциальных распределений C_1 и C_2 , а также эквивалентную интенсивность отказов и среднее время наработки на отказ, если через 1000 часов после начала испытаний из 100 первоначально взятых объектов отказали 30 объектов. Первичные интенсивности отказов принять равными: $\lambda_1=0,000105$ 1/час и $\lambda_2=0,0012$ 1/час.
13. Вычислить методом среднегрупповых интенсивностей максимальное и минимальное значения интенсивности отказов керамического конденсатора, если при номинальных условиях эксплуатации $U_{ном}=450$ В, $t_{ном}=25^\circ\text{C}$ и $g_{ном}=9,81\text{м/с}^2$ реальная эксплуатация происходит при $U_{раб}=250$ В, $t_{раб}=75^\circ\text{C}$ и $g_{раб}=15\text{м/с}^2$. (Использовать данные табл.3.1 и 3.2).
14. Вычислить коэффициентным методом максимальное и минимальное значения интенсивности отказов электродвигателя (использовать данные табл.3.3).

15. Определить методом среднегрупповых интенсивностей характеристики надежности – максимальные и минимальные значения λ_{Σ} , $P(1000)$, T_{CP} источника питания, схема которого включает в себя следующие элементы:
- 1 силовой трансформатор;
 - 5 кремниевых полупроводниковых диодов;
 - 3 резистора;
 - 1 керамический конденсатор;
 - 1 электролитический конденсатор;
 - 2 штепсельных разъема.
- Источник эксплуатируется при сетевом напряжении до 250 В, при температуре до 60°C и в условиях вибрации с ускорением до 25 м/с².
16. Определить коэффициентным методом характеристики надежности – максимальные и минимальные значения λ_{Σ} , $P(1000)$, T_{CP} электронного моста, схема которого включает в себя следующие элементы:
- 2 силовых трансформатора;
 - 15 кремниевых полупроводниковых диодов;
 - 35 кремниевых транзисторов;
 - 5 германиевых транзисторов;
 - 68 резисторов;
 - 12 керамических конденсаторов;
 - 8 электролитических конденсаторов;
 - 8 штепсельных разъемов;
 - 1 электродвигатель.
17. Определить вероятность безотказной работы за 5000 часов и среднее время наработки на отказ системы с общим постоянным нагруженным резервированием с кратностью 3. Интенсивность отказов нерезервированной системы $\lambda_n = 1,25 \cdot 10^{-3}$ 1/час. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
18. Определить необходимую кратность общего нагруженного резервирования, если среднее время наработки на отказ нерезервированной системы равно 4500 часов, а требуемое значение среднего времени наработки на отказ – 12000 часов. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
19. Определить необходимую кратность общего нагруженного резервирования, если вероятность безотказной работы нерезервированной системы за 5000 часов равна 0,85, а требуемое значение вероятности безотказной работы – 0,95. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
20. Определить вероятность безотказной работы за 3000 часов и среднее время наработки на отказ системы с общим ненагруженным резервированием с кратностью 2. Интенсивность нерезервированной системы $\lambda_{\Sigma} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.

21. Определить необходимую кратность общего ненагруженного резервирования, если среднее время наработки на отказ нерезервированной системы равно 2500 часов, а требуемое значение среднего времени наработки на отказ – 10000 часов. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
22. Определить необходимую кратность общего ненагруженного резервирования, если вероятность безотказной работы нерезервированной системы за 10000 часов равна 0,85, а требуемое значение вероятности безотказной работы – 0,92. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
23. Определить вероятность безотказной работы за 4000 часов и среднее время наработки на отказ системы, включающей в себя 20 основных и 12 резервных нагруженных элементов. Интенсивность отказов элементов системы $\lambda_{\Sigma} = 1,35 \cdot 10^{-4}$ 1/час. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
24. Определить вероятность безотказной работы за 3000 часов и среднее время наработки на отказ системы, включающей в себя 15 основных и 10 резервных ненагруженных элементов. Интенсивность отказов элементов системы $\lambda_{\Sigma} = 1.35 \cdot 10^{-4}$ 1/час. Характеристики надежности подчиняются экспоненциальному закону.
25. Определить число необходимых резервных элементов (ненагруженное скользящее резервирование) для системы из 20 основных элементов со средним временем наработки на отказ $T_0=5000$ час. Требуемое среднее время наработки на отказ системы 1500 час.
26. Определить кодовое расстояние для самокорректирующегося кода, позволяющего обнаруживать 3 и исправлять 1 ошибку.
27. Определить вероятность безотказной работы за 5000 часов системы с информационным резервированием. Незащищенная часть системы имеет интенсивность отказов $3 \cdot 10^{-6}$ 1/час. Другая часть системы защищена самокорректирующимся кодом с возможностью обнаружения и исправления 2-х ошибок и имеет интенсивность отказов $5 \cdot 10^{-5}$ 1/час.
28. Определить необходимую корректирующую способность кода (количество одновременно исправляемых ошибок) для системы с вероятностью безотказной работы $P(3000)=0,88$. Требуемое значение вероятности безотказной работы $P_{рез}(3000)=0,92$.
29. Вероятность безотказной работы системы с временным резервированием при заданном времени выполнения функций $v=2c$ и кратности временного резервирования $n=5$. Вероятность безотказной работы системы за время выполнения функции $p(v)=0,95$.
30. Определить среднее время выполнения функции, продолжительностью $5c$ на промежутке времени $20c$ при вероятности безотказной работы системы за $5c$ $p(5)=0,99$

Список литературы

1. Балакирев В.С. Надежность технических и программных средств автоматизации: учеб. пособие. / В.С. Балакирев, В.Я. Бадеников – Ангарск: АТИ, 1994 – 64 с.
2. Половко, А. А. Основы теории надежности : учеб. пособие для вузов /А. А. Половко. – 2-е изд, перераб.и доп. – СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
3. Половко, А. М. Основы теории надежности. Практикум : учеб. пособие для вузов / А. М Половко. – СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 559 с.
4. Глазунов Л.П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. – Л.: Энергоатомиздат, 1984 – 208 с.
5. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для вузов./ [А.М.Корытин и др] – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 432 с.
6. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. / Ф.Байхельт, П.Франкен – М.: Радио и связь, 1988 – 392 с.
7. Надежность технических систем: Справочник/ [Р.Барлоу и др.] ; Под ред. И.А.Ушакова – М.: Радио и связь, 1985 – 606 с.
8. Самарский А.П. Технические средства автоматики. Электронные системы: учеб. пособие./ А.П. Самарский; Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново,1987. – 85 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. Основные понятия теории надежности	3
1. Количественные характеристики надежности	5
2. Основные законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности	11
3. Методы расчета характеристик надежности в системах без резервирования	15
4. Резервирование в системах контроля и управления.	21
5. Задания для самостоятельной работы.	31
Список литературы.	35

Редактор В.Л.Родичева

Подписано в печать 7.12.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 2,09. Тираж 50 экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический
университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и финансов
ФГБОУ ВО «ИГХТУ»
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7