ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
АРЗАМАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ФИЛИАЛ НГТУ)

А.В. БАРАНОВА, Н.П. ЯМПУРИН

Основы надежности электронных средств

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»

Нижний Новгород 2005

УДК 621.396.6.049.77
ББК 32.844
Б241

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент СПбГЭТУ (ЛЭТИ) А.В. Матвеев,
профессор кафедры радиоэлектронных средств СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
А.В. Митрофанов

Баранова А.В., Ямпурин Н.П.
Б241 Основы надежности электронных средств: учеб. пособие для студентов всех форм обучения / А.В. Баранова, Н.П. Ямпурин; НГТУ (АПИ) – Нижний Новгород: НГТУ, 2005. – 97 с.

ISBN 5-93272-327-0

Приведены краткие теоретические сведения по основам надежности ЭС, контрольные вопросы, примеры и задачи по всем разделам пособия.

Предназначено для студентов специальностей 200800 (210200.65) – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», 071900 (230201.65) – «Информационные системы и технологии» всех форм обучения.

Рис. 66. Табл. 9. Библиограф.: 7 назв.

УДК 621.396.6.049.77
ББК 32.844

ISBN 5-93272-327-0

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие написано авторами на основе их многолетнего опыта преподавания курса «Основы конструирования и надежности электронных средств» в Арзамасском политехническом институте (филиале НГТУ). Также использован опыт преподавания курса «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС» для студентов специальности 200800 в МАИ (техническом университете) профессором А.В. Фоминым и доцентом О.Н. Умрихиным.

Основное внимание уделяется показателям надежности как неремонтируемой, так и ремонтируемой аппаратуры, анализу структурных схем надежности, теории надежности восстанавливаемых изделий. С целью оказания максимальной помощи читателю в овладении методами определения надежности ЭС в учебном пособии представлен необходимый комплект примеров и задач, а также приведены их решения.

Книга состоит из семи глав: первая глава содержит основные термины и определения; вторая – характеристики надежности РЭС при внезапных отказах; третья глава посвящена законам распределения случайных величин, используемых при анализе надежности РЭС; в четвертой описываются структурные схемы надежности РЭС, в пятой рассматриваются вопросы резервирования РЭС; в шестой главе приводятся методики расчета характеристик надежности восстанавливаемых изделий, в седьмой – оценка надежности аппаратной части информационных систем.

Авторы считают данное пособие существенным дополнением к имеющимся учебникам по теории надежности. Учебное пособие будет полезно студентам, обучающимся по специальностям «Проектирование и технология РЭС» и «Информационные системы и технологии» при выполнении курсовых и дипломных работ. Материал может быть использован преподавателями вузов как для аудиторных занятий, так и при организации самостоятельной работы студентов.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ

Все изделия радиоэлектронной промышленности характеризуются качеством, то есть определённой совокупностью свойств, которые существенно отличают данное изделие от других, определяют степень его пригодности для эксплуатации по своему назначению. В процессе эксплуатации РЭС вследствие износа и необратимых процессов старения характеристики аппаратуры (а следовательно, и её качество) будут изменяться. Изменение качества во времени характеризует один из главных его показателей – ***надёжность***.

Под надёжностью понимают свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в определенных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортировки. Надёжность оценивают по таким характеристикам изделия, как ***работоспособность***, ***долговечность***, ***безотказность***, ***ремонтопригодность***, ***сохраняемость***.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Долговечность определяется свойством изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для профилактического обслуживания. Предельное состояния изделия определяется невозможностью его дальнейшей эксплуатации, обусловленной либо снижением его эффективности, либо требованиями безопасности, оговоренными в технической документации.

Безотказностью называют свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

Ремонтопригодность определяется приспособленностью изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путём проведения профилактического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – это свойство РЭС поддерживать свои эксплутационные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки, установленного технической документацией [1].

1.2. ОТКАЗЫ И НЕИСПРАВНОСТИ

Отказ – случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Отказы бывают ***внезапные*** и ***постепенные***. Внезапными называют отказы, возникающие в результате изменения одного или нескольких параметров изделия. Постепенные отказы – такие, при которых наблюдается постепенное изменение главных параметров изделия либо в результате его износа, либо старения. Отказы, возникновение которых не связано с предшествующими отказами, называют ***независимыми***. Отказы, появляющиеся вследствие предшествующих случаев – ***зависимые***. По внешним признакам отказы делятся на явные и неявные. Первые могут быть обнаружены визуально, вторые –с помощью специальных измерений.

По характеру устранения отказы подразделяются на ***устойчивые*** и ***самоустраняющиеся***. Устойчивые отказы сравнительно просто обнаруживаются и обычно легко устраняются. Самоустраняющиеся отказы исчезают сами. Их обнаружить и устранить бывает очень сложно. Они проявляются в виде ***сбоя***, или в форме перемежающегося отказа. Сбоем называют однократно возникающий и самоустраняющийся отказ. Отказ – это один из видов ***неисправности*** изделия, под которой подразумевают несоответствие изделия одному или нескольким требованиям, предъявляемым к нему техническими условиями. Не все неисправности являются отказами. Те из них, которые не приводят к отказу в процессе эксплуатации, называют ***дефектами*** [1].

1.3. СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

В теории надёжности различают надёжность системы, устройства, аппаратуры в целом и надёжность элементов, входящих в систему.

Системой называется совокупность совместно действующих объектов, полностью обеспечивающая выполнение определённых практических задач. Под ***объектом*** понимают различные взаимодействующие технические устройства. Иногда вместо термина система употребляют аналогичный ему по смыслу – ***аппаратура***. Системы могут быть восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемая система после отказа подвергается ремонту и продолжает выполнять свои функции. Большинство используемых на практике систем относятся к восстанавливаемым.

Невосстанавливаемая система в случае возникновения отказа не подлежит или не подаётся восстановлению либо по экономическим, либо по техническим соображениям.

Системы различают также по характеру обслуживания. Те из них, которые выполняют свои задачи при наличии обслуживающего персонала, обычно приспособлены к устранению отказов во время эксплуатации и относятся к ***обслуживаемым***.

Необслуживаемые системы выполняют возложенные на них функции без обслуживающего персонала. Они могут быть самовосстанавливаемыми, то есть приспособлены к самостоятельному устранению отказов без участия обслуживающего персонала, например, за счёт автоматического резервирования.

По характеру влияния отказов элементов системы на её выходной параметр можно разделить на простые и сложные.

Простые системы при отказе элементов либо полностью теряют работоспособность, либо продолжают выполнять свои функции в полном объёме, если отказавший элемент зарезервирован. Такие системы могут находиться только в двух состояниях: рабочем и нерабочем.

Сложные системы обладают способностью при отказе элементов выполнять свои функции, но с меньшей эффективностью, то есть они могут находиться в нескольких рабочих состояниях. К сложным системам обычно относят многоканальные комплексы с разветвлённой структурой, состоящие из нескольких самостоятельных, но взаимосвязанных устройств, например, компьютерные сети.

Элементом называется часть системы, не имеющая самостоятельного эксплутационного назначения и выполняющая в ней некоторые функции. Для практического использования любого элемента необходимо соединить его с другими элементами в определённую систему. Элементами являются различные радиодетали (резисторы, конденсаторы, интегральные схемы, кабели, реле, …), а также более сложные конструкции, входящие в состав устройств. При анализе надёжности блочных и функциональных систем в качестве элементов могут рассматриваться отдельные каскады, узлы, блоки. Элементами сложных систем являются отдельные устройства, агрегаты.

В ряде случаев одно и то же устройство может выступать либо в роли системы, либо элемента, что зависит от решаемой задачи [1].

1.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия надёжности РЭС.
2. Что такое работоспособность РЭС?
3. Что такое долговечность РЭС?
4. Что такое безотказность РЭС?
5. Что такое ремонтопригодность РЭС?
6. Что такое сохраняемость РЭС?
7. Что называется отказом РЭС?
8. Какие виды отказов бывают в РЭС?
9. Что называется сбоем в РЭС?
10. Что называется системой в РЭС?
11. Какие виды систем используются в РЭС?
12. Какие системы являются простыми?
13. Какие системы являются сложными?
14. Что называется элементом в РЭС?

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ

Количественно надежность характеризуется ***показателями надежности***, отражающими те или иные ее свойства. В зависимости от того, какие свойства надежности показатели отражают, они могут быть единичными или комплексными.

2.1. ЕДИНИЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ РЭС

Согласно ГОСТ 27.002-83, выделяют следующие шесть основных показателей: ***вероятность безотказной работы*** *P(t)*; ***гамма-процентная наработка до отказа*** T_γ; ***интенсивность отказов*** $\lambda(t)$; ***средняя наработка до первого отказа*** $T_{ср}$; ***средняя наработка на отказ*** T_0; ***параметр потока отказов*** *V(t)*.

Четыре первых показателя используются для оценки надежности неремонтируемых (невосстанавливаемых) изделий РЭС, а два последних - для оценки надежности ремонтируемых (восстанавливаемых) радиоизделий. В частном случае, если, например, оценивается надежность ремонтируемого радиоизделия до первого отказа, они совпадают, но в общем случае показатели надежности ремонтируемой и неремонтируемой РЭС имеют разное математическое описание. Дадим теперь вероятностное и статистическое определение основных показателей надежности, а также проанализируем их основные свойства.

2.1.1. *Вероятность безотказной работы*

Вероятностью безотказной работы *P(t)* называют вероятность того, что в заданном интервале времени (0, *t*) или просто за время *t* радиоизделие не откажет, т. е.

$$P(t) = p\{\theta \geq t\}, \tag{2.1}$$

где θ – случайная величина, характеризующая время работы радиоизделия до отказа. Функция *P(t)* обладает следующими основными свойствами: $0 \leq P(t) \leq 1$; $P(0) = 1$; $P(\infty) = 0$.

Типичный график функции *P*(*t*), называемый в специальной литературе «кривой убыли» изделий, приведен на рис. 2.1.

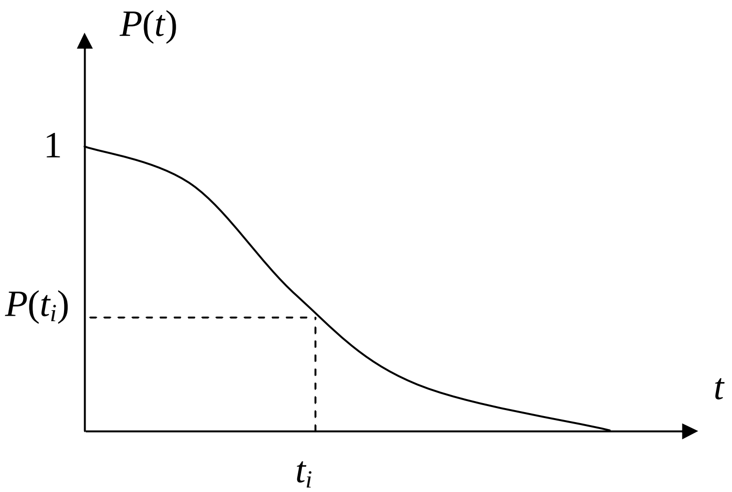


Рис. 2.1

Величина $P(t_i)$ характеризует долю работоспособных изделий, остающихся к моменту времени t_i, в чем и состоит физический смысл функции *P*(*t*). Наряду с вероятностным определением $P(t)$ используется и статистическое определение вероятности безотказной работы $\overline{P}(t)$:

$$\overline{P}(t) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \tag{2.2}$$

где N_0 – общее число радиоизделий, поставленных на испытания; $N(t)$ – число радиоизделий, исправных в момент времени t; $n(t)$ – число радиоизделий, отказавших на интервале $(0, t)$. При $N_0 \to \infty$ функции (2.1) и (2.2) будут равны.

Вероятность безотказной работы может быть определена и для произвольного интервала времени (t_0, t), что на практике соответствует работе радиоизделия еще до момента времени t_0. В этом случае говорят об условной вероятности безотказной работы $P(t_0, t)$, имея в виду, что в момент времени t_0 (начало наработки) изделие было работоспособно. Условная вероятность определяется так:

$$P(t_0, t) = p\{\theta \geq t_0, \theta \geq t\} = P(t) / P(t_0), \tag{2.3}$$

где $P(t_0)$ и $P(t)$ – вероятности безотказной работы на интервалах времени $(0, t_0)$ и $(0, t)$ соответственно. Статистически условная вероятность безотказной работы определяется следующим образом:

$$\overline{P}(t_0, t) = N(t) / N(t_0). \tag{2.4}$$

Помимо $P(t)$, в литературе встречаются и другие, вспомогательные функции – вероятность отказа $Q(t)$ и производная по времени от нее $\varphi(t)$, являющаяся плотностью распределения наработки до отказа. $Q(t)$ – вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ радиоизделие откажет, т. е.

$$Q(t) = p\{\theta \prec t\}. \tag{2.5}$$

Поскольку $P(t)$ и $Q(t)$ образуют полную группу несовместных событий, то

$$P(t) + Q(t) = 1. \tag{2.6}$$

Статистически $\overline{Q}(t)$ определяется отношением

$$\overline{Q}(t) = n(t) / N_0, \tag{2.7}$$

где $n(t)$ и N_0 введены ранее в (2.2).

Плотность распределения наработки до отказа (иногда называется ***частотой отказов***) $\varphi(t) = dQ(t) / dt$ или с учетом (2.6) $\varphi(t) = -dP(t) / dt$, т. е. $\varphi(t)$ представляет собой «скорость» снижения надежности изделия во времени. Произведение $\varphi(t)dt$ характеризует безусловную вероятность того, что изделие откажет в интервале времени $(t, t + dt)$ при условии, что до момента времени t оно находилось в работоспособном состоянии. Статистически $\varphi(t)$ определяется отношением

$$\bar{\varphi}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_0 \Delta t}, \qquad (2.8)$$

где $\Delta n(t)$ – число отказов на интервале Δt.

2.1.2. *Гамма-процентная наработка до первого отказа*

Гамма-процентная наработка до первого отказа T_γ есть наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах ($P_\gamma = \gamma / 100\%$):

$$P_\gamma = 1 - \int_0^{T_\gamma} \varphi(t)dt. \qquad (2.9)$$

Статистическое определение:

$$\bar{P}(T_\gamma) = \bar{P}_\gamma = N(T_\gamma)/N_0, \qquad (2.10)$$

где $N(T_\gamma)$ - число радиоизделий, исправных на момент времени T_γ.

2.1.3. *Интенсивность отказов*

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ есть условная плотность вероятности отказа изделия в некоторый момент времени наработки при условии, что до этого момента отказов не было:

$$\lambda(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{(1 - Q(t))} = \frac{\varphi(t)}{P(t)}. \qquad (2.11)$$

Величина $\lambda(t)dt$ характеризует условную вероятность того, что радиоизделие откажет в интервале времени (t, $t + dt$) при условии, что в момент времени t оно находилось в работоспособном состоянии. Статистически интенсивность отказов $\bar{\lambda}(t)$ определяется как доля изделий, которые отказывают в единицу времени после момента времени t:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n}{N(t)\Delta t}, \qquad (2.12)$$

где $n(t)$ и $n(t + \Delta t)$ – число изделий, отказавших к моментам t и $t + \Delta t$.

Интенсивность отказов часто называют λ- характеристикой или «кривой жизни изделия».

Опыт эксплуатации РЭС показывает, что изменение интенсивности отказов системы длительного действия происходит так, как показано на рис. 2.2.

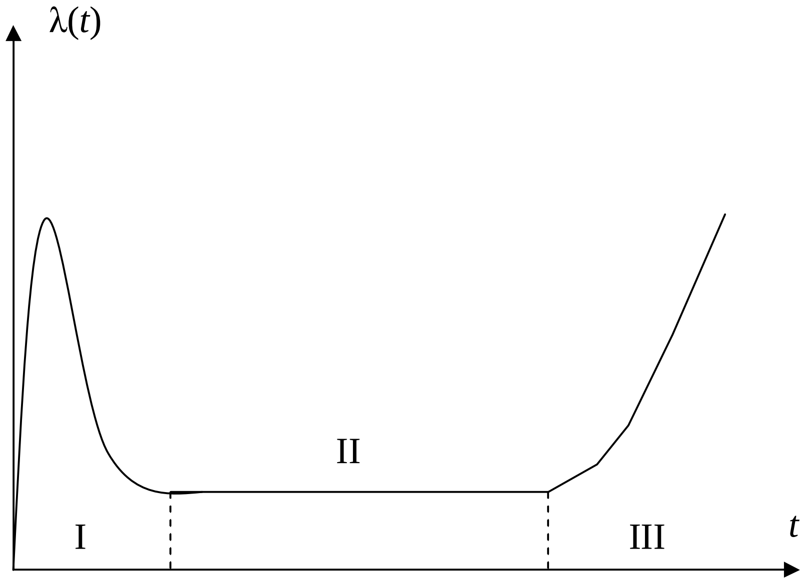


Рис. 2.2

I – участок начального периода (приработка аппаратуры). В этом периоде наблюдается повышенное число отказов за счёт различных производственных недостатков и выхода из строя наиболее ненадёжных элементов со скрытыми дефектами. По мере выхода из строя дефектных элементов и замене их более полноценными, интенсивность отказов системы понижается. Продолжительность периода приработки зависит от типа аппаратуры и вида характеристик входящих в систему элементов. Обычно период приработки составляет десятки и сотни часов. Чем более однородны характеристики элементов, тем короче период приработки. Малая продолжительность периода приработки является достоинством аппаратуры, так как перед началом эксплуатации этот период может быть исключён, в результате предварительной тренировки на заводе изготовителе.

II – участок нормальной эксплуатации системы. Он характеризуется пониженным уровнем и постоянством интенсивности отказов во времени. Продолжительность этого периода зависит от среднего срока службы элементов аппаратуры и условий эксплуатации. Он составляет обычно несколько тысяч часов и характеризует долговечность аппаратуры. Интенсивность отказов в период нормальной эксплуатации может быть понижена за счёт профилактических мероприятий. Участку нормальной эксплуатации соответствует экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы.

III – участок массового износа и старения элементов. Он характеризуется значительным ростом числа отказов. С наступлением этого периода дальнейшая эксплуатация системы нецелесообразна.

2.1.4. *Средняя наработка до первого отказа*

Средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$ представляет собой математическое ожидание $M(t)$ времени исправной работы t радиоизделия до первого отказа:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty t\varphi(t)dt\,. \qquad (2.13)$$

Вид функции φ*(t)* определяется конкретным законом распределения случайной величины *t*. Статистически $\overline{T}_{\text{ср}}$ находится как среднее арифметическое значение реализаций случайного интервала времени θ работы изделия до первого отказа:

$$\overline{T}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{N_0} \theta_i \,/\, N_0\,, \qquad (2.14)$$

где θ_i – время наработки *i*-го изделия до первого отказа; N_0 – число исправных изделий, поставленных на испытания.

2.1.5. *Средняя наработка на отказ*

Средняя наработка на отказ T_0 есть математическое ожидание интервала времени между соседними отказами:

$$T_0 = \int_0^\infty dF_k(t)\,, \qquad (2.15)$$

где $F_k(t)$ – функция распределения случайного времени исправной работы $\theta_к$ между (*k*-1)-м и *k*-м отказами. Статистически наработка на отказ определяется как среднее арифметическое значение реализаций случайного времени $\theta_{к,i}$ исправной работы изделия между (*k*-1)-м и *k*-м отказами без учета времени ремонта:

$$\overline{T}_0 = \sum_{i=1}^{m} \theta_{k,i} \,/\, m\,, \qquad (2.16)$$

где *m* – число отказов испытываемых изделий. Предполагается, что все вышедшие из строя радиоизделия заменяются новыми или восстанавливаются, т. е. число испытываемых изделий сохраняется одинаковым на протяжении всего испытания.

2.1.6. *Параметр потока отказов*

В качестве другого показателя надежности ремонтируемой РЭС используется параметр потока отказов *V*(*t*), под которым понимается предел отношения вероятности появления хотя бы одного отказа за промежуток времени Δt к величине промежутка при $\Delta t \to 0$, т. е.

$$V(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left(p\{t, t + \Delta t\} / \Delta t \right). \qquad (2.17)$$

В статистическом смысле параметром потока отказов (средней частотой отказов) $\overline{V}(t)$ называется отношение числа отказов $\Delta n'$ в единицу времени к общему числу N_0 испытываемых изделий, включая и отказы, возникшие после замены отказавших элементов:

$$\overline{V}(t) = \Delta n'/(N_0 \Delta t). \qquad (2.18)$$

Заметим, что в сравнении с (2.12), $\Delta n' \geq \Delta n$, ибо в случае ремонтируемой РЭС число отказов может возрасти.

Наибольшее значение в теории надежности имеет так называемый простейший поток отказов. ***Простейший поток*** отказов – это такой поток, который удовлетворяет условиям стационарности, отсутствия последствия и ординарности. ***Ординарный поток*** событий имеет место, когда вероятность появления двух и более отказов в единичном интервале времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного отказа. ***Стационарный поток*** событий имеет постоянное относительное число отказов в единичном интервале времени. ***Отсутствие последействия*** означает, что вероятность появления отказов в единичном интервале времени не зависит от возникновения отказов во всех других непересекающихся интервалах времени, т.е. отказы возникают независимо друг от друга. Для стационарных потоков отказов $\lambda(t)$ = const, а значения $V(t)$ и $\lambda(t)$ совпадают, т. е. $V(t) = \lambda(t) = \text{const}$.

2.2. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ОТДЕЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ НЕРЕМОНТИРУЕМОЙ РЭС

Основной характеристикой надежности является вероятность безотказной работы $P(t)$, связанная с вероятностью отказа $Q(t)$ зависимостью (2.6).

2.2.1. *Связь между частотой отказов* $\varphi(t)$ *и вероятностью безотказной работы* $P(t)$

Интегрируя правую и левую часть соотношения (2.8) в пределах от 0 до t для $Q(t)$, имеем выражение $Q(t) = \int_0^t \varphi(t)dt$. Подставляя его в (2.6), получаем

$$P(t) = 1 - \int_0^t \varphi(t)dt = \int_t^\infty \varphi(t)dt. \qquad (2.19)$$

2.2.2. *Связь между частотой отказов* $\overline{\varphi}(t)$, *интенсивностью отказов* $\overline{\lambda}(t)$ *и вероятностью безотказной работы* $\overline{P}(t)$

Воспользуемся статистическим определением интенсивности отказов $\overline{\lambda}(t)$. После деления числителя и знаменателя выражения (2.12) на $N_0 \Delta t$ имеем

$$\overline{\lambda}(t) = \frac{\Delta n/(N_0 \Delta t)}{(N(t)\Delta t)/(N_0 \Delta t)} = \frac{\Delta n/(N_0 \Delta t)}{N(t)/N_0},$$

но выражение, стоящее в числителе есть $\overline{\varphi}(t)$, а в знаменателе, согласно (2.2), $\overline{P}(t)$, тогда

$$\overline{\lambda}(t)=\overline{\varphi}(t)/\overline{P}(t), \tag{2.20}$$

что полностью совпадает с (2.11).

2.2.3. *Аналитическая связь между вероятностью безотказной работы* $P(t)$ *и интенсивностью отказов* $\lambda(t)$

Воспользуемся равенством (2.9) и запишем формулу (2.11) в следующем виде:

$$\lambda(t)=-\frac{dP(t)}{dt}\frac{1}{P(t)}=-\frac{d}{dt}\ln P(t). \tag{2.21}$$

Интегрируя (2.21) от 0 до *t*, можно записать $\ln P(t)=-\int_0^t \lambda(t)dt,$ или потенциируя окончательно имеем

$$P(t)=\exp(-\int_0^t \lambda(t)dt). \tag{2.22}$$

Формула (2.22) – одна из важнейших в теории надежности невосстанавливаемых изделий. Для практически важного случая $\lambda(t)=\lambda=\text{const}$ имеем из (2.22)

$$P(t)=\exp(-\lambda t), \tag{2.23}$$

т.е. в период нормальной эксплуатации радиоизделия вероятность безотказной работы снижается по экспоненциальному закону.

2.2.4. *Связь между средней наработкой до первого отказа* $T_{\text{ср}}$ *и вероятностью безотказной работы* $P(t)$

Для определения величины $T_{\text{ср}}$ подставляем (2.8) в (2.13):

$$T_{\text{ср}}=\int_0^\infty t\left(-\frac{dP(t)}{dt}\right)dt=-\int_0^\infty t\,dP(t),$$

Откуда после интегрирования по частям получаем $T_{\text{ср}}=-tP(t)\big|_0^\infty+\int_0^\infty P(t)dt$ но первый интеграл равен нулю, поэтому

$$T_{\text{ср}}=\int_0^\infty P(t)dt \tag{2.24}$$

Выражение (2.24) показывает, что «кривая убыли» радиоизделий (рис. 2.1) обладает следующими свойствами: площадь, ограниченная ею и осями координат, численно равна среднему времени безотказной работы $T_{ср}$. В случае, когда λ = const, из (2.24) имеем

$$T_{ср} = 1/\lambda . \qquad (2.25)$$

После подстановки (2.25) в (2.22) получаем

$$P(t) = \exp(-t/T_{ср}) . \qquad (2.26)$$

2.2.5. *Связь между гамма-процентной наработкой до отказа T_γ и средней наработкой до отказа $T_{ср}$*

Подставим (2.26) в (2.8), а полученное $\varphi(t)$ – в (2.9). После преобразования имеем $P_\gamma = \exp(-T_\gamma / T_{ср})$, откуда после логарифмирования

$$T_\gamma = -T_{ср} \ln(P_\gamma) = -T_{ср} \ln(\gamma/100) . \qquad (2.27)$$

Из (2.27) следует, что при $P_\gamma < e^{-1}$ $T_{ср} < T_\gamma$, а в противном случае ($P_\gamma > e^{-1}$) $T_{ср} > T_\gamma$.

Таким образом, если известен один из показателей надежности $P(t)$, $\lambda(t)$ или $T_{ср}$, то этого вполне достаточно для нахождения других показателей надежности.

В большинстве случаев предпочтение при расчетах отдают интенсивности отказов $\lambda(t)$. Это объясняется только тем, что она, как правило, выражается более простыми математическими зависимостями и ее удобнее определять экспериментально. Значение λ – характеристик элементов РЭС – приводится в соответствующих справочниках [3].

2.3. ЕДИНИЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Согласно [1], выделяют два основных показателя: ***вероятность восстановления в заданное время*** $P_В(\tau)$ и ***среднее время восстановления*** $T_В$. Дадим вероятностное и статистическое определение показателей ремонтопригодности.

Вероятностью восстановления в заданное время $P_В(\tau)$ называют вероятность того, что время восстановления ε окажется меньше τ, т.е.

$$P_В(\tau) = p\{\varepsilon \le \tau\} = F(\tau) , \qquad (2.28)$$

или статистически

$$\overline{P_В}(\tau) = n_В(\tau)/N_В , \qquad (2.29)$$

где $n_В(\tau)$ – число изделий, восстановленных за время τ; $N_В$ – число изделий, которое надо восстановить.

Среднее время восстановления $T_В$ представляет собой математическое ожидание времени восстановления работоспособности изделия

$$T_B = \int_0^\infty \tau\varphi(\tau)d\tau\,, \tag{2.30}$$

что статистически можно представить

$$\overline{T_{\text{В}}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{В}}} \tau_{\text{В},i} / N_{\text{В}}\,, \tag{2.31}$$

где $\tau_{\text{В},i}$ – время восстановления i-го изделия, $i = \overline{1, N_{\text{В}}}$.

2.4. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РЭС

В настоящее время существуют три комплексных показателя надежности РЭС. Это коэффициенты готовности $K_{\text{г}}$; технического использования $K_{\text{ти}}$; оперативной готовности $K_{\text{ог}}$.

Коэффициент готовности $K_{\text{г}}$ –вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени в течение времени работы $t_{\text{р}}$:

$$K_{\text{г}} = T_0 / (T_0 + T_{\text{В}})\,, \tag{2.32}$$

где T_0 – наработка на отказ, определяемая (2.15). Статистически $\overline{K_{\text{г}}} = t_{\text{раб}\Sigma} / (t_{\text{раб}\Sigma} + t_{\text{рем}\Sigma})$, где $t_{\text{раб}\Sigma}$ и $t_{\text{рем}\Sigma}$ – суммарные времена работы и ремонта.

На практике часто используются вспомогательный показатель – ***коэффициент простоя*** $K_{\text{п}}$. Он характеризует вероятность того, что изделие неработоспособно в произвольный момент времени:

$$K_{\text{п}} = T_{\text{В}} / (T_0 + T_{\text{В}})\,. \tag{2.33}$$

Очевидно, $K_{\text{г}}$ и $K_{\text{п}}$ образуют полную группу событий, т.е. $K_{\text{г}} + K_{\text{п}} = 1$.

Коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ – отношение математического ожидания времени пребывания изделия в работоспособном состоянии к сумме математических ожиданий времени работы изделия, ремонта и технического обслуживания $T_{\text{обсл}}$:

$$K_{\text{ти}} = T_0 / (T_0 + T_{\text{В}} + T_{\text{обсл}})\,, \tag{2.34}$$

$$\overline{K_{\text{ти}}} = t_{\text{раб}\Sigma} / (t_{\text{раб}\Sigma} + t_{\text{рем}\Sigma} + t_{\text{обсл}\Sigma})\,, \tag{2.35}$$

где $t_{\text{обсл}\Sigma}$ – суммарное время технического обслуживания.

Коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ог}}$ – вероятность того, что радиоизделие окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, безотказно проработает время $t_{\text{р}}$:

$$K_{\text{ог}} = P(t_{\text{з}}) = K_{\text{г}} P(t_{\text{р}})\,, \tag{2.36}$$

где $P(t_{\text{з}})$ – вероятность выполнения задачи.

2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Перечислите основные показатели надежности.
2. Что такое вероятность безотказной работы?
3. Нарисуйте кривую убыли изделия и поясните ее физический смысл.
4. Что называется частотой отказов, что она характеризует?
5. Что характеризует гамма-процентная наработка до первого отказа?
6. Что такое интенсивность отказов?
7. Нарисуйте «кривую жизни» изделия и объяснить ее вид.
8. Что называется средней наработкой до первого отказа?
9. Что называется средней наработкой на отказ?
10. Что такое параметр потока отказов?
11. Какие потоки отказов являются простейшими?
12. Запишите формулу связи частоты отказов и вероятности безотказной работы.
13. Запишите формулу связи частоты отказов, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов.
14. Запишите формулу связи вероятности безотказной работы и интенсивности отказов.
15. Запишите формулу связи между средней наработкой до первого отказа и вероятностью безотказной работы.
16. Запишите формулу связи между гамма-процентной наработкой до отказа и средней наработкой до отказа.
17. Какие единичные показатели ремонтопригодности Вы знаете?
18. Какие комплексные показатели надежности Вы знаете?
19. Что такое коэффициент готовности? Чем он отличается от коэффициента оперативной готовности?
20. На испытание поставлена 1 000 однотипных резисторов С2-54. За 10 000 ч отказало пять. Определить вероятность безотказной работы за 10 000 ч.

Решение

По формуле (2.2) определяем статистическую величину вероятности безотказной работы резисторов за 10 000 часов [5]:

$$\overline{P}(10000) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{1000 - 5}{1000} = 0{,}995.$$

Ответ: 0,995.

21. В процессе приработки радиоизделия из 120 шт. вышло из строя 10. Определить вероятность исправной работы и вероятность отказа радиоизделия на начальном этапе эксплуатации.

Ответ: 0,92; 0,08.

22. В процессе испытаний 1 000 электролитических конденсаторов за первые 100 ч наблюдений вышли из строя два конденсатора, а за последующие 200 ч еще пять. Найти вероятность безотказной работы на интервале от 100 до 300 ч.

Решение

Используя формулу (2.4), определяем условную вероятность безотказной работы [5]:

$$P(100,300)=\frac{N(t_2)}{N(t_1)}=\frac{N_0-(n_1+n_2)}{N_0-n_1}=\frac{1000-7}{1000-2}=\frac{993}{998}=0{,}995.$$

Ответ: 0,995.

23. С начала эксплуатации радиоизделия, содержащего 1 000 элементов, произошло за первые 500 ч три отказа, за последующие 500 ч еще один отказ. Найти вероятность безотказной работы за 500 ч, 1 000 ч и на интервале от 500 до 1 000 ч.

Ответ: 0,997; 0,996; 0,999.

24. Определить вероятность отказа резисторов, если при испытании 1 000 шт. через 100 ч осталось исправными 990 шт.

Ответ: 0,01.

25. Известно, что вероятность исправной работы РЭИ на участке от 100 до 200 ч составила 0,98. Число испытываемых изделий N_0=1 000, число отказов в указанном интервале пять. Найти число изделий, исправных к моменту 100 и 200 ч.

Ответ: 250; 245.

26. На испытании находилось 1 000 образцов неремонтируемой аппаратуры. Число отказов фиксировалось через каждые 50 ч до 500 ч. Данные об отказах приведены в табл. 2.1. Построить «кривую убыли» аппаратуры.

Таблица 2.1

Δt_i, 10^2·ч	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5
$n(\Delta t_i)$	9	6	4	4	3	3	3	4	4	5

27. На испытании находилось 1 000 образцов неремонтируемой аппаратуры. Число отказов фиксировалось через каждые 500 ч до 10 000 ч. Данные об отказах приведены в табл. 2.2. Построить «кривую убыли» аппаратуры. Определить вероятность безотказной работы в момент 300 ч, и условную вероятность безотказной работы на интервале от 7 000 до 8 000 ч.

Таблица 2.2

Δt_i, 10^2·ч	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5
$n(\Delta t_i)$	9	6	4	4	3	3	3	4	3	3

Δt_i, 10^2·ч	5-5,5	5,5-6	6-6,5	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-8,5	8,5-9	9-9,5	9,5-10
$n(\Delta t_i)$	4	5	6	6	8	7	8	9	10	11

28. На испытании 1 000 транзисторов в течение 500 ч было получено отказов: за первые 200 ч – пять, в последующие 300 ч – еще десять. Найти интенсивность отказов за первые 200 ч и в последующие 300 ч.

    Ответ: $2{,}5\cdot10^{-5}$ч$^{-1}$; $3{,}33\cdot10^{-5}$ ч$^{-1}$.

29. Определить число резисторов, которые необходимо поставить на испытания, чтобы получить не менее 50 отказов за 10 000 ч испытаний, если ожидаемая интенсивность отказа одного резистора $\overline{\lambda}(t) = 5\cdot10^{-5}$ ч$^{-1}$.

    Ответ: 100.

30. Интенсивность отказов РЭИ на интервале от 1 200 до 1 500 ч составила $5\cdot10^{-5}$ч$^{-1}$, число отказов на этом интервале 50. Определить число исправных к моменту 1 500 ч.

    Ответ: 3 283.

31. Интенсивность отказов конденсаторов, поставленных на испытания на интервале от 1 000 до 1 100 ч, составила $4\cdot10^{-4}$ч$^{-1}$, число отказов на этом интервале десять. Найти вероятность безотказной работы на этом интервале.

    Ответ: 0,96.

32. Результаты испытаний 1 000 интегральных схем за 25 000 ч приведены в табл. 2.3. Интервал испытаний 1 000 ч.

Таблица 2.3

Δt_i, 10^3·ч	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
$\Delta n_i(t)$	20	25	35	50	30	50	40	40	50

Δt_i, 10^3·ч	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
$\Delta n_i(t)$	30	40	40	50	40	50	40	50	40

Δt_i, 10^3·ч	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25
$\Delta n_i(t)$	50	35	50	35	25	30	20

Используя результаты статистических испытаний ИС, приведенные в табл. 2.3, построить временную зависимость кривой жизни изделия, указать этапы жизненного цикла.

33. Результаты статистических испытаний 1 000 образцов неремонтируемой аппаратуры приведены в табл. 2.4. Число отказов фиксировалось через каждые 100 ч работы. Построить зависимость интенсивности отказов от времени. Указать, на каком этапе жизненного цикла изделия проводились испытания.

Таблица 2.4

Δt_i, 10^2·ч	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
$\Delta n_i(t)$	50	40	32	25	20	17	16	16	15	14

34. Результаты статистических испытаний 10 000 образцов неремонтируемой аппаратуры приведены в табл. 2.5. Число отказов фиксировалось через каждые 100 ч работы. Построить зависимость интенсивности отказов от времени. Указать на каком этапе жизненного цикла изделия проводились испытания.

Таблица 2.5

Δt_i, 10^2·ч	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
$\Delta n_i(t)$	50	40	32	25	20	17	16	16	15	14	13

Δt_i, 10^2·ч	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
$\Delta n_i(t)$	12	12	13	11	12	15	17	18	20

35. На испытания поставлена партия из 1 000 однотипных транзисторов. За первые 3 000 ч отказало 80, а за последующие 1 000 ч еще 50. Определить статистически интенсивность отказов на интервале 3 000 … 4 000 ч.

Ответ: $5{,}4\cdot10^{-4}$ч$^{-1}$.

36. Определить интенсивность отказов интегральной схемы на интервале 1 800 и 2 600 ч, если из 200 интегральных схем, поставленных на испытания, до отказа проработали: 1 800 ч – одна, 2 000 ч – две, 2 200 ч – четыре, 2 400 ч – – две, 2 600 ч – одна.

Ответ: $5{,}65\cdot10^{-5}$ч$^{-1}$.

37. Вероятность безотказной работы за 3 000 ч равна 0,95 при числе отказов, равном пяти, а за 3 100 ч равна 0,9. Найти число изделий поставленных на испытания, и число отказов на интервале 3 000 … 3 100 ч.

Ответ: 100; 5.

38. Известно, что при испытании 500 конденсаторов число отказов за первые 10 000 ч составило четыре, а далее за 1 000 ч еще пять. Найти вероятность безотказной работы P(10000, 11000).

Ответ: 0,99.

39. Проводилось наблюдение за работой трех образцов РЭС. Время работы первого составило 181 ч, число отказов – шесть, второй образец проработал 329 ч и имел одиннадцать отказов, третий экземпляр работал 245 ч и отказывал восемь раз. Определить среднюю наработку до первого отказа одного образца РЭС.

Ответ: $T_{ср}$=30,5 ч.

40. За наблюдаемый период эксплуатации одного образца радиолокационной станции было зарегистрировано 15 отказов. До начала наблюдения станция проработала 258 ч, а к концу наблюдения наработка составила 1 233 ч. Определить среднюю наработку до первого отказа.

Ответ: $T_{ср}$=65 ч.

41. Интенсивность отказов, полученная при испытаниях серии ИС из 1 000 шт., равна $2 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$. Определить количество ИС, вышедших из строя за 1 000 ч.

Ответ: 2.

42. В результате наблюдения за 450 образцами радиоэлектронного изделия получены данные об отказах образцов, приведенные в табл. 2.6. Найти зависимость интенсивности отказов во времени и определить период нормальной эксплуатации. Интервал испытаний 100 ч.

Таблица 2.6

Δt_i, $10^2 \cdot$ч	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
$\Delta n_i(t)$	19	13	8	6	5	5	4	4	4	4	4	3

Δt_i, $10^2 \cdot$ч	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
$\Delta n_i(t)$	4	4	3	7	5	8	10	20

43. На испытания поставлено 1000 элементов переключателей, число отказов фиксировались каждые 500 ч вплоть до 100 000 ч. Данные об отказах приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Δt_i, $10^3 \cdot$ч	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5
$\Delta n_i(t)$	142	83	74	65	61	54	49	43	40	35

Δt_i, $10^3 \cdot$ч	5-5,5	5,5-6	6-6,5	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-8,5	8,5-9	9-9,5	9,5-10
$n_i(\Delta t)$	33	33	30	30	40	40	16	10	11	10

Построить «кривую жизни» изделия и определить время начала периода старения.

44. Известно, что при испытании конденсаторов частота отказов за 1 000 ч составила $5 \cdot 10^{-5}$ ч$^{-1}$. При этом наблюдаемое число отказов 50. Найти число конденсаторов, поставленных на испытания.

Ответ: 1 000.

45. Испытание РЛС проводилось 30 дней. Первый отказ произошел через 12 ч. Время восстановления станции составило 8 ч. Второй отказ – через трое суток после первого. Время поиска неисправности и ремонта составило 6 ч. Третий и последний отказ произошел через 15 суток после второго. Время восстановления 3 ч. Найти среднее время безотказной работы станции и среднее время восстановления.

Ответ: 173 ч; 5,6 ч.

46. Частота отказов РЭС имеет вид $\varphi(t) = C_1\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$. Определить вероятность безотказной работы за 1 000 ч, если $C_1 = 0{,}9$, $C_2 = 0{,}1$, $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$.

Решение

На основании формулы (2.19) определяем

$$P(t) = 1 - \int_0^t \varphi(t)dt = 1 - t\int_0^t \left[C_1\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}\right] dt =$$

$$= 1 - \left[- C_1 e^{-\lambda_1 t}\Big|_0^t - C_2 t^{-\lambda_2 t}\Big|_0^t\right] = 1 - \left(C_1 + C_2\right) + C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 t^{-\lambda_2 t}$$

$$P(1000) = 0{,}9e^{-5\cdot 10^{-4}\cdot 10^3} + 0{,}1e^{-5\cdot 10^{-4}\cdot 10^3} = 0{,}627.$$

47. Частота отказов РЭС имеет вид $\varphi(t) = C_1\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$ Определить среднюю наработку на отказ, если $C_1 = 0{,}9$; $C_2 = 0{,}1$; $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$ и интенсивность отказов за 1 000 ч.

Ответ: $\lambda(t) = 2{,}864 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $T_{ср}$=2300 ч.

48. Известно, что $\varphi(t) = \dfrac{2}{3}\lambda_0 e^{-\lambda_0 t}(1 + e^{-\lambda_0 t})$, определить вероятность безотказной работы за 100 ч, если $\lambda_0 = 8{,}5 \cdot 10^{-5}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 0,545.

49. Полученная зависимость вероятности безотказной работы аппаратуры выражается в виде $P(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}$, где C_1, C_2, λ_1, λ_2 – постоянные

величины, причем $C_1+C_2 = 1$. Найти среднее время наработки до первого отказа, если $C_1 = 0{,}8$; $\lambda_1 = 2\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $\lambda_2 = 3\cdot10^{-5}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 10 700 ч.

50. Установлено, что $P(t) = \frac{1}{2}e^{-\lambda_0 t}(1+e^{-3\lambda_0 t})$. Найти зависимость частоты отказов от времени, если λ_0 = const. Определить частоту отказов за 100 ч при $\lambda_0 = 2\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$.

Ответ: $5\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$.

51. Известно, что зависимость частоты отказов от времени некоторого изделия имеет вид $\varphi(t) = e^{-\lambda_0 t}\frac{(1+e^{-\lambda_0 t})}{t}$. Найти среднее время наработки до первого отказа, если λ_0 постоянная и равна $3\cdot10^{-5}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 5 000 ч.

52. Зависимость частоты отказов от времени изделия имеет вид $\varphi(t) = \frac{A}{t^2+b^2}$. Найти зависимость от времени вероятности безотказной работы $P(t)$ при $t > 0$. Определить вероятность $P(t)$ за 1 000 ч при b=100 ч, t=1 000 ч, A=2 ч.

Ответ: 0,97.

53. В результате анализа данных об отказах изделия установлено, что частота отказов имеет вид $\varphi(t) = 2\lambda_0 e^{-\lambda_0 t}(1-e^{-\lambda_0 t})$. Определить величину интенсивности отказов за 1 000 ч, считая λ_0 постоянной величиной, равной $2\cdot10^{-4}$ч$^{-1}$.

Ответ: $6\cdot10^{-5}$ч.

54. Установлено, что вероятность безотказной работы изделия выражается формулой $P(t) = 3e^{-\lambda_0 t} - 3e^{-2\lambda_0 t} + e^{-3\lambda_0 t}$. Определить среднее время наработки до первого отказа, считая $\lambda_0 = 5\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 3 700 ч.

55. Известно, что частота отказов РЭС аппроксимируется формулой $\varphi(t) = 6\lambda_0 e^{-2\lambda_0 t}(1+e^{-\lambda_0 t})$, где $\lambda_0 = 2\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$. Определить среднее время наработки до первого отказа.

Ответ: $1{,}08\cdot10^4$ ч.

56. Интенсивность отказов изделия зависит от времени и выражается формулой $\lambda(t)=\dfrac{k(1-e^{-kt})}{(1-0{,}5e^{-kt})}$. Требуется определить вероятность безотказной работы за 1 000 ч, если k = 3·10^{-4} ч$^{-1}$.

Ответ: 0,768.

57. Интенсивность отказов изделия зависит от времени и выражается функцией $\lambda(t)=\dfrac{k^2t}{1+kt}$. Найти зависимость от времени вероятности безотказной работы изделия. Определить вероятность безотказной работы за 100 ч, если k = 2·10^{-4} ч$^{-1}$.

Ответ: 0,998.

58. Используя данные предыдущей задачи, найти зависимость от времени частоты отказов.

Ответ: $\dfrac{k}{(1+kt)^2}$.

59. Зависимость частоты отказов от времени $\varphi(t)=\dfrac{k^2t}{3}e^{-kt}$. Требуется найти зависимость от времени интенсивности отказов изделия.

Ответ: $\dfrac{k^2t}{1+kt}$.

60. Используя данные предыдущей задачи, найти среднее время наработки до первого отказа при k = 2·10^{-4} ч$^{-1}$.

Ответ: 1 667 ч.

61. Пусть некоторая РЭС за время работы (8 ч) характеризуется вероятностью безотказной работы P(8) = 0,992612. Для коэффициента готовности $K_\text{г}$ = 0,9 необходимо определить: вероятность выполнения задачи; время восстановления; среднее время наработки между отказами. Указание: принять закон распределения вероятности выполнения работы РЭС за время $t_\text{р}$ экспоненциальным.

Решение

1. Согласно определения (2.36), вероятность выполнения задачи есть коэффициент оперативной готовности:

$$K_{\text{ог}} = K_{\text{г}} P(t_{\text{р}}) = 0{,}9 \cdot 0{,}992612 = 0{,}8933.$$

2. Из формулы для экспоненциального закона надежности (2.26) после логарифмирования можно получить формулу для расчета среднего времени наработки между отказами:

$$T_0 = -t_{\text{р}} / \ln[P(t_{\text{р}})] = -8 / \ln(0{,}992612) \cong 1{,}08 \text{ ч.}$$

3. Из выражения для коэффициента готовности (2.34) можно получить после преобразования формулу для расчета времени восстановления

$$T_{\text{В}} = T(1 - K_{\text{г}}) / K_{\text{г}} = 1{,}08(1 - 0{,}9) / 0{,}9 = 0{,}12 \text{ ч.}$$

62. Время наработки между отказами радиоизделия равно 150 ч при вероятности выполнения задачи 0,95$P(t_{\text{р}})$. Необходимо определить: время работы $t_{\text{р}}$; коэффициент готовности; время восстановления при $P(t_{\text{р}})$ = 0,9. Задачу решить при допущениях в задаче 61.

Ответ: 1 423ч; 0,855; 25,4 ч.

63. Время восстановления РЭС равно 5 ч при вероятности безотказной работы 0,9 и времени выполнения задания $P(t_{\text{з}})$ = 0,81. Определить: время работы; коэффициент готовности; время наработки на отказ.

Ответ: 64 ч; 0,729; 13,5 ч.

3. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ РЭС

В основе большинства процессов, ведущих к возникновению отказов РЭС, лежат общие закономерности. Поэтому распределения случайных величин, описывающие реальные процессы возникновения отказов в РЭС, можно приближенно заменять какими-либо известными в теории вероятностей распределениями.

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин: для дискретных случайных величин – биномиальный закон и распределение Пуассона; для непрерывных случайных величин – экспоненциальный и нормальный законы, закон Вейбулла, гамма-распределение и распределение Рэлея.

3.1. БИНОМИАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Биномиальный закон распределения характеризует вероятность появления события ν в m независимых опытах. Если вероятность появления события ν в одном опыте равна p (соответственно вероятность его непоявления $1 - p = q$), а число независимых испытаний равно m, то вероятность появления события v n-раз в серии m опытов P_m^n может быть представлена математической интерпретацией биномиального закона распределения следующим образом:

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}, \tag{3.1}$$

где C_m^n – число сочетаний m по n, равное

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}. \tag{3.2}$$

При этом следует иметь в виду, что C_m^n представляет собой целое положительное число. Очевидно, что вероятности p являются членами разложения по биному Ньютона.

Основные характеристики биномиального распределения следующие:

- математическое ожидание $M(v) = pn$;
- дисперсия $\sigma^2(v) = M(v)q$;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma(\nu) = \sqrt{M(\nu)q}$.

Биномиальный закон распределения применяют обычно при статистическом контроле качества, когда имеется очень мало сведений о поведении изделий, а их необходимо классифицировать на годные и бракованные [4].

3.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУАССОНА

Распределение Пуассона имеет место в тех случаях, когда на некотором интервале $(0,t)$ случайное событие v появляется с малой вероятностью, равной p. События v, следующие друг за другом, образуют поток. Если поток событий v удовлетворяет требованиям стационарности, ординарности и отсутствия последействия, т.е. является простейшим потоком, то распределение Пуассона описывается выражением

$$P_m = \frac{A^m}{m!} e^{-A}, \tag{3.3}$$

где P_m – вероятность появления m событий v в заданном интервале t; A – математическое ожидание (среднее число) событий в том же интервале времени t.

Среднее число отказов изделия в заданном интервале времени t в теории надежности принято называть показателем надежности.

Для простейшего потока отказов $A = \lambda t$, тогда

$$P_m = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}, \tag{3.4}$$

где λ – интенсивность случайного события, называемая часто параметром закона Пуассона.

Основные характеристики распределения Пуассона следующие:

- математическое ожидание $M(v) = \lambda t$;
- дисперсия $\sigma^2(v) = \lambda t$,

причем $M(v) = \sigma^2(v)$, что является особенностью этого распределения.

Распределение Пуассона рассматривается как предельный случай биномиального распределения, когда вероятность p стремится к нулю (соответственно $q = 1- p \to 1$), на практике это совпадение приемлемо при $p < 0{,}1$. Но, в отличие от биномиального распределения, при котором величина $m \le N$, в распределении Пуассона на m сверху не накладывается ограничение ($m \ge 0$). При $m = 0$, согласно (1.31), можно получить вероятность безотказной работы за время t

$$P_0 = P(t) = \exp(-\lambda t), \tag{3.5}$$

следовательно, экспоненциальный закон надежности является частным случаем распределения Пуассона.

Биномиальное распределение применяют для любого p, а распределение Пуассона – только для малого p. Поэтому в математическом смысле закон распределения Пуассона уже биномиального распределения, но в физическом смысле он шире вследствие своей применимости. Так, для ремонтируемой РЭС после окончания периода приработки, когда $\lambda = 1/T_{\text{ср}}$ = const, случайное число отказов в процессе эксплуатации распределено по закону Пуассона, а вероятность появления событий будет

$$P_m(t) = \frac{1}{m!}\left(\frac{t}{T_{\text{ср}}}\right)^m e^{-t/T_{\text{ср}}}. \tag{3.6}$$

Распределение Пуассона обычно применяют для определения вероятности появления некоторого числа событий (отказов) на заданном интервале времени при условии независимости и совместности событий (отказов).

Рассмотрим далее законы распределения непрерывных случайных величин, которые характеризуются дополнительно понятием плотности распределения $\varphi(t)$ и функции распределения $F(t)$ случайной величины.

3.3. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Этот закон распределения наиболее популярен в инженерной практике. Так, промежуток времени между двумя соседними отказами в простейшем потоке отказов есть непрерывная случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону:

$$\varphi(t) = \lambda_0 \exp(-\lambda_0 t), \quad t \geq 0\,. \tag{3.7}$$

Соответствующая (3.7) интегральная функция распределения имеет вид

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t \varphi(t)dt = 1 - e^{-\lambda_0 t}\,. \tag{3.8}$$

В период нормальной эксплуатации РЭС время работы между отказами подчинено экспоненциальному закону распределения с параметрами $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$, вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda_0 t}, \tag{3.9}$$

а $\varphi(t)$ удовлетворяет (3.7).

Соответствующие кривые приведены на рис. 3.1.

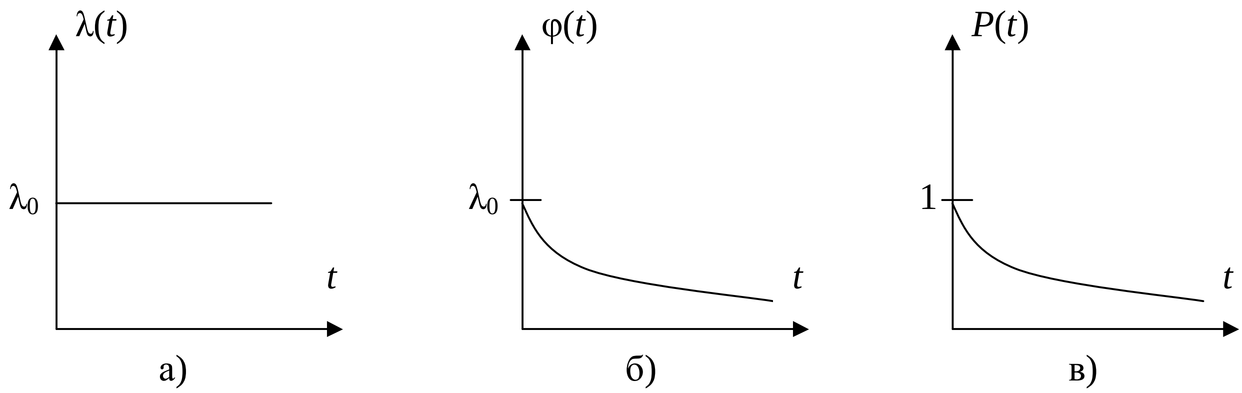


Рис. 3.1

Независимость интенсивности отказов во времени – главная особенность этого распределения. Условие $\lambda(t)$ = const означает, что интенсивность и среднее время безотказной работы равны соответственно параметру простейшего потока отказов и наработке на отказ:

$$\left.\begin{aligned} \lambda(t) &= V(t) = \text{const} \\ T_{\text{ср}} &= T_0. \end{aligned}\right\} \tag{3.10}$$

Выясним смысл среднего времени безотказной работы $T_{\text{ср}}$: подставив в (3.9) $t = T_{\text{ср}}$, получим $P(T_{\text{ср}}) = \text{e}^{-1} \approx 0{,}37$, т. е. $T_{\text{ср}}$ есть время, в течение которого вероятность безотказной работы изделия уменьшается в e раз. Выясним смысл показателя надежности $A = \lambda t$. Для этого полагаем $A \ll 1$ и, разлагая e^{-A} в ряд Тейлора и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получаем $P(t) = e^{-A} \approx 1 - A$, откуда

$$Q(t) \approx A, \tag{3.11}$$

т. е. среднее число отказов при λt <<1 равно вероятности отказа за время t.

Особенностью этого распределения является инвариантность вероятности безотказной работы радиоизделия в интервале времени (t_0, $t_0 + \Delta t$) к расположению начала интервала времени Δt по оси абсцисс. Действительно, пусть в момент времени t_0 РЭС работоспособна, тогда вероятность безотказной работы РЭС $P(\Delta t)$ в интервале Δt, согласно уравнению (2.3), с учетом (3.9) будет

$$P(\Delta t) = \exp[-\lambda_0 (t_0 + \Delta t)]/\exp(-\lambda_0 t_0) = \exp(-\lambda_0 \Delta t)\,.$$

Из полученного выражения следует, что $P(\Delta t)$ действительно не зависит от времени наработки t_0 к началу интервала времени Δt. Это физически означает, что экспоненциальный закон распределения не учитывает предыстории процесса. Теоретически этот закон может быть применен только к радиоизделиям, которые не подвержены износу в процессе эксплуатации и старению во времени, что противоречит природе радиоизделий. Поэтому на практике этим законом распределения надо пользоваться в тех случаях, когда процессы старения и износа в РЭС протекают достаточно медленно и анализируется сравнительно небольшой период «жизни» радиоизделий.

Как правило, экспоненциальный закон надежности используют при оценке надежности сложных изделий, отказы которых обусловлены большим числом входящих в их состав компонентов. Его применяют при исследовании времени наработки на отказ неремонтируемых изделий для определения времени между соседними отказами в ремонтируемых изделиях.

3.4. НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

В теории надежности оно встречается наиболее часто. Им хорошо описывается работоспособность РЭС в процессе износа и естественного старения, когда возникают отказы в виде ухода параметров за пределы заданных допусков вследствие воздействия температуры, радиации и т. д. (параметрические отказы). Этот закон еще называют предельным, потому что к нему приближаются другие законы распределения и их композиции в часто встречающихся типичных условиях. Его плотность распределения для случайной величины X имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right], \tag{3.12}$$

где a и b постоянные величины, называемые параметрами закона нормального распределения, причем b – величина положительная, a может быть положительной, отрицательной и равной нулю [2].

Основные характеристики нормального распределения следующие:

- математическое ожидание $M(X) = a$;
- дисперсия $\sigma^2(X) = b$.

Вероятность попадания величины X в интервал (x_1, x_2) вычисляется по формуле

$$P_x = P(x_1 \le X \le x_2) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1), \qquad (3.13)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа или интеграл вероятностей;

$z_1 = \frac{x_1 - a}{\sigma}$; $z_2 = \frac{x_2 - a}{\sigma}$.

Интеграл вероятности является табличным интегралом, его значения приводятся в Приложении. Он является нечетной функцией $\Phi(-z) = -\Phi(z)$.

Если требуется найти вероятность попадания случайной величины X в пределы симметричного поля с параметрами $a - \delta$ и $a + \delta$, где δ – половина поля допуска, то $P_x = 2\Phi(\delta/\sigma)$. Если $\delta = 3\sigma$, то $P_x = 0{,}9973$. Такого уровня надежности вполне достаточно при определении надежности по параметрическим отказам, и вероятность отклонения параметров РЭС за пределы $\pm 3\sigma$ в большинстве случаев можно не учитывать [2].

3.5. ЛОГАРИФМИЧЕСКОЕ НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Логарифмическое нормальное распределение непрерывной неотрицательной величины X имеет место, если ее десятичный логарифм $z = \lg x$ распределен по нормальному закону. Плотность распределения величины X будет

$$f(x) = \frac{\mu}{x\sigma} \text{ср}\left[\frac{\lg x - \lg x_0}{\sigma}\right], \qquad (3.14)$$

$$f(x) = \frac{\mu}{x\sigma^2(z)} \exp\left\{-\frac{[z - M(z)]^2}{2\sigma^2(z)}\right\}, \qquad (3.15)$$

где $\lg x_0 = M(z)$; $M(z)$, $\sigma(z)$, $\sigma^2(z)$ – соответственно математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и дисперсия случайной величины z, $\mu = 0{,}4343$.

Основные характеристики логарифмически нормального распределения следующие:

- математическое ожидание $M(X) = x_0 \exp\left[\frac{\sigma^2(z)}{2\mu^2}\right] = x_{\text{ср}}$;
- дисперсия $\sigma^2(X) = x_{\text{ср}}^2[(x_{\text{ср}}/x_0)^2 - 1]$.

Логарифмически нормальное распределение используется обычно при оценке отказа из-за износа. В тех случаях, когда отказ является результатом усталостных повреждений, наработка до отказа часто подчиняется логарифмически нормальному закону. Этот закон применяется также для оценки затрат времени, необходимого для отыскания и устранения отказа. Им хорошо аппроксимируются случайные величины, образующиеся в ходе умножения большого числа независимых или слабо коррелированных случайных величин [2].

3.6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА

Распределение Вейбулла характеризует распределение непрерывной случайной величины при $t \geq 0$. Частота отказов $\varphi(t)$ в законе Вейбулла имеет вид

$$\varphi(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}, \qquad (3.16)$$

тогда вероятность безотказной работы, согласно (2.19),

$$P(t) = 1 - \int_0^t \varphi(t)dt = e^{-\lambda_0 t^k}, \qquad (3.17)$$

а интенсивность отказов и среднее время безотказной работы будут

$$\lambda(t) = \varphi(t) / P(t) = \lambda_0 k t^{k-1};$$

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)dt = \Gamma(\tfrac{1}{k}+1)\lambda_0^{-1/k}, \qquad (3.18)$$

где $\Gamma(1/k + 1)$ – гамма-функция; λ_0 и k – параметры распределения Вейбулла – постоянные величины, имеющие определенные значения для каждого класса изделий. Графики функций представлены на рис. 3.2.

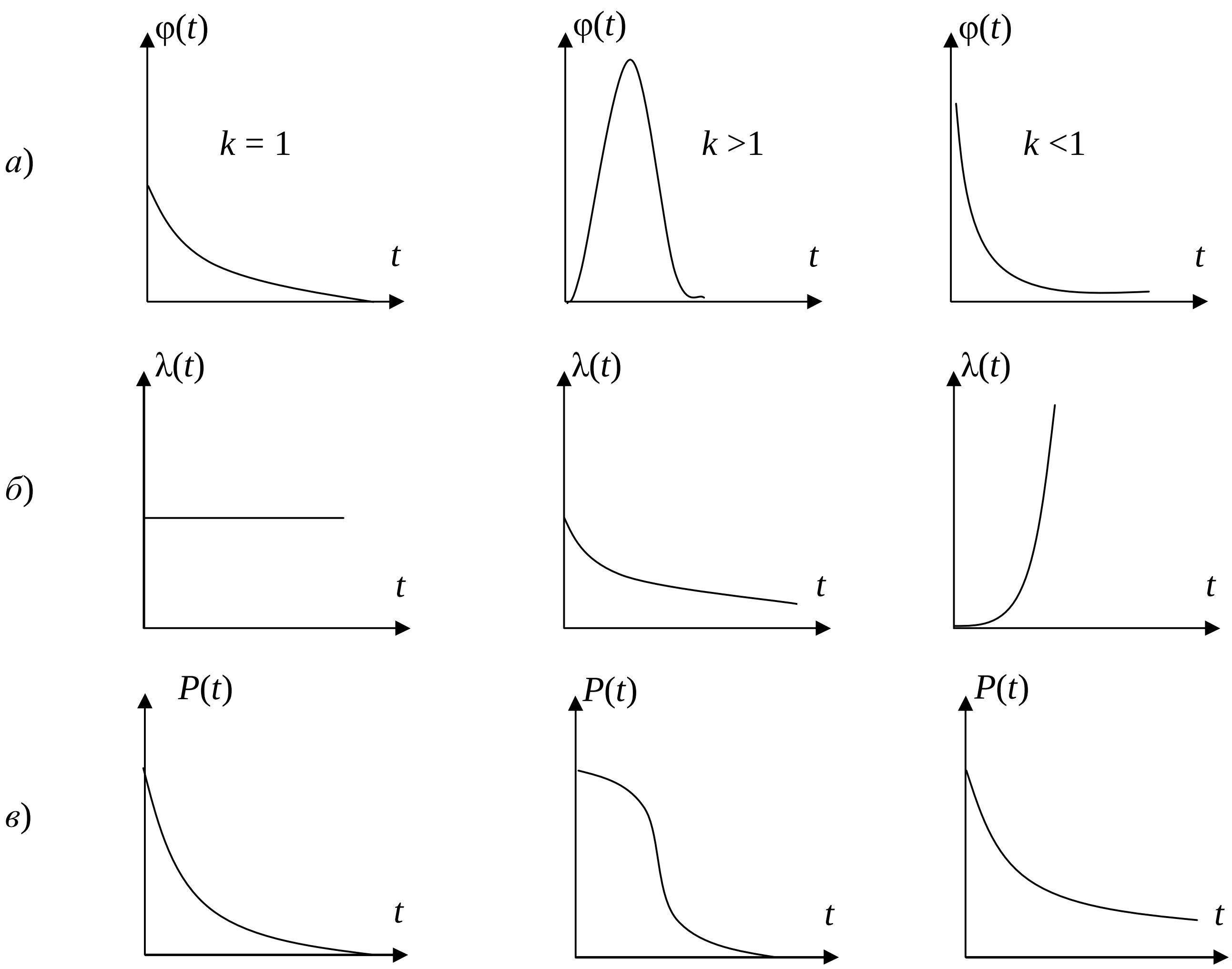


Рис. 3.2

Распределение Вейбулла в теории надежности широко используется при исследовании характеристик надежности полупроводниковых приборов (k < 1), применяется при ускоренных испытаниях компонентов РЭС в форсированных режимах и при исследовании надежности в период приработки (k < 1), а также при износе и старении.

3.7. ГАММА-РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Гамма-распределение имеет следующие показатели надежности:

- частота отказов

$$\varphi(t) = \lambda_0{}^k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t} /(k-1)!; \tag{3.19}$$

- вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \tag{3.20}$$

- интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}; \tag{3.21}$$

- среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)dt = \frac{k}{\lambda_0}$.

Параметры гамма-распределения λ_0 и k, а также зависимости (3.19) – (3.21) аналогичны соответствующим параметрам и графикам распределения Вейбулла, поэтому подробно не анализируются.

Основные характеристики гамма-распределения:

- математическое ожидание $M(t) = \lambda_0{}^k$;
- дисперсия $\sigma^2(t) = \lambda_0{}^2 k$.

Гамма-распределение используется в теории надежности при оценке характеристик надежности компонентов РЭС и радиоизделий в начальный период эксплуатации (k > 1), при исследовании электромеханических и механических устройств, элементов высоконадежной РЭС с интенсивностью отказов, уменьшающейся во времени (k < 1). Гамма-распределение описывает распределение времени отказов РЭС, резервированной способом замещения, когда наработка на отказ основной и резервной систем описывается экспоненциальным законом распределения. В этом случае параметр k равен общему количеству систем, включая и основную единицу РЭС.

При k = 1 гамма-распределение переходит в экспоненциальное; чем больше k, тем распределение более симметрично и при k > 1 переходит в нормальный закон распределения. В ряде случаев параметр k имеет наглядный физический смысл.

Например, если отказ наблюдается при выходе более k элементов, то формула (3.21) описывает частоту отказов при интенсивности отказа каждого элемента λ.

3.8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЭЛЕЯ

В том случае, когда времена возникновения отказов распределены по закону Рэлея, основные показатели надежности принимают следующий вид:

$$\varphi(t) = (t/\sigma^2)\exp(-t^2/2\sigma^2)\,; \tag{3.22}$$

$$P(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2)\,; \tag{3.23}$$

$$\lambda(t) = t/\sigma^2 \tag{3.24}$$

$$T_{\text{ср}} = \sigma\sqrt{\pi/2} \tag{3.25}$$

где σ – дисперсия времени безотказной работы. Соответствующие зависимости, построенные согласно (3.22), (3.23) и (3.24), приведены на рис. 3.3. Рисунок 3.3 демонстрирует особенность распределения – линейное возрастание интенсивности отказов во времени. По этой причине закон Релея используется для описания характеристик надежности компонентов РЭС с явно выраженным эффектом старения.

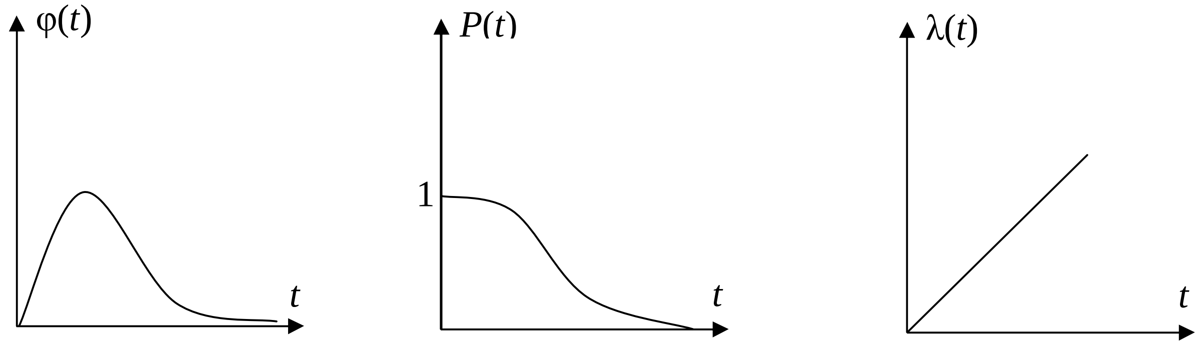


Рис. 3.3

3.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Перечислите наиболее распространенные законы распределения случайных величин, применяемых в теории надежности.
2. Запишите биномиальный закон распределения.
3. Запишите вероятность появления m событий на интервале времени t (закон распределения Пуассона).
4. Запишите показатели надежности при экспоненциальном распределении случайных величин.
5. Запишите нормальный закон распределения случайной величины.
6. Запишите показатели надежности при распределении Вейбулла.
7. Запишите показатели надежности при гамма-распределении.

8. Запишите показатели надежности распределения Релея.
9. Связь космического аппарата с Землей осуществляется по пяти каналам, работающим независимо друг от друга. Вероятность того, что откажет любой канал в течение времени t, равна 0,1. Какова вероятность того, что в указанном интервале времени $(0,t)$ откажет ровно один канал ; откажет не более двух каналов, не менее трех каналов

Решение

Используем биномиальный закон распределения, считая, что событие A состоит в отказе любого из каналов за время t, т.е. $P = P(A) = 0{,}1$, тогда $q = 1 - P = 0{,}9$.

Вероятность того, что откажет:

- один канал – $P_5(1) = C_5^1 P^1 q^{5-1} = \dfrac{5!}{4!\cdot 1!} 0{,}1 \cdot 0{,}94 = 0{,}324$;
- не более двух каналов –

$$P_5(i \le 2) = \sum_{i=0}^{2} P_5(i) = C_5^0 P^0 q^5 + C_5^1 P^1 q^4 + C_5^2 P^2 q^3 = 0{,}535 + 0{,}324 + 0{,}0273 \approx 0{,}986;$$

- не менее трех каналов –

$$P_i(i \ge 3) = 1 - \sum_{i=0}^{2} P_5(i \le 2) = 1 - C_5^0 P^0 q^5 - C_5^1 P^1 q^4 - C_5^2 P^2 q^3 = 1 - 0{,}986 = 0{,}014.$$

10. Система содержит три блока, работающих независимо друг от друга. Вероятность безотказной работы любого равна 0,9. Найти вероятность того, что откажет: а) ровно два блока; б) менее двух блоков; в) не более двух блоков; г) не менее двух блоков.

    Ответ: 0,027; 0,972; 0,999; 0,028.

11. Радиосистема состоит из трех блоков, работающих независимо друг от друга. Вероятность отказа любого блока в течение времени t равна P. Найти вероятность того, что за время t откажут все блоки, будет работать хотя бы один блок, если P=0,9.

    Ответ: 0,73; 0,243.

12. Радиосистема выполняет задачу, если исправны любые два из трех каналов. Найти вероятность выполнения задачи за 10 ч, если интенсивность отказов $5\cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$.

    Ответ: 0,999.

13. Система состоит из пяти резервных элементов. Вероятность отказа каждого элемента за время t равна 0,25 . Определить вероятность того, что за время t будет исправен хотя бы один элемент; откажут все пять элементов.

Ответ: 0,015; 0,001.

14. Вероятность того, что в устройстве за время t откажет один элемент, равна 0,9. Считая, что элементов пять, вероятность отказа любого из них независима, найти вероятность того, что за время t откажет не более трех элементов.

Ответ: 0,081.

15. Устройство состоит из четырех независимо работающих друг от друга элементов. Вероятность отказа любого элемента в течение времени t равна 0,05. Найти вероятность того, что за время t откажет не менее двух элементов.

Ответ: 0,014.

16. РЭС состоит из 1 000 узлов. Вероятность отказа любого узла в течение одного года равна 0,001 и не зависит от состояния других узлов РЭС. Какова вероятность того, что будет ровно два отказа и не менее двух отказов за год.

Решение

Определим среднее число отказов за год: $A = nq = 1000 \cdot 0{,}001 = 1$.
Вероятности отказа двух узлов определим по распределению Пуассона:

$$P(m=2) = P_2 = \frac{A^2}{2!}e^{-A} = \frac{e^{-1}}{2!} = 0{,}184.$$

Вероятность отказа не менее двух узлов за год

$$P(m \geq 2) = 1 - \sum_0^1 P_n = 1 - P_0 - P_1 = 1 - e^{-A}(1+A) = 1 - 2e^{-1} = 0{,}264.$$

17. Вероятность наличия брака в партии транзисторов составляет 2%. Найти вероятность того, что среди взятых наугад 100 транзисторов будет один бракованный.

Ответ: 0,27.

18. В памяти ПЭВМ содержится 2 000 бит информации, вероятность наличия неправильно записанного бита – 0,1%. Какова вероятность того, что среди

взятых наугад 10 бит информации будет не более двух неправильно записанных.

Ответ: 0,676.

19. РЭС состоит из 100 узлов. Вероятность отказа любого узла в течение времени t равна 0,01 и не зависит от других узлов. Найти вероятность не более трех отказов за это время.

    Ответ: 0,997.

20. РЭС состоит из 100 узлов. Среднее число отказов за год составляет два. Найти вероятность не более трех отказов за год.

    Ответ: 0,998.

21. Вероятность того, что в устройстве за время t откажет хотя бы один элемент, равна 0,98. Считая, что число элементов N_0 системы велико, а вероятность отказа любого элемента $P<<1$, найти среднее число элементов, отказавших за время t.

    Ответ: 4.

22. Вероятность того, что за время t в устройстве с числом элементов $N_0>>1$ не откажет ни одного элемента, равна 0,05. Считая, что вероятность отказа для одного элемента $P<<1$ (редкие события), найти среднее число элементов, отказавших за время t.

    Ответ: 3.

23. РЭС состоит из 1 000 элементов. Математическое ожидание числа отказов за один год равно единице. Найти вероятность более трех отказов за год.

    Ответ: 0,04.

24. РЭС состоит из большого числа независимо работающих элементов с одинаковой интенсивностью отказа каждого элемента $P<<1$ за время t. Найти среднее число элементов, отказавших за время t , если вероятность того, что за время t не произойдет отказа ни одного элемента, равна e^{-2}.

Решение

Воспользуемся распределением Пуассона. Если A среднее число отказов за время t , то при m=0 (ни одного отказа в РЭС) имеем

$$(A^0/0!)e^{-A} = e^{-2}, \text{ т.е. } e^{-A} = e^{-2}, \text{ откуда } A = 2.$$

Ответ: 2.

25. Вероятность того, что в устройстве за время t откажет хотя бы один элемент равна 0,95. Считая, что число элементов N_0 системы велико, а вероятность q отказа любого из них мала, найти среднее число элементов, отказавших за время t.

Ответ: 3.

26. Вероятность того, что за время t в устройстве с N_0>>1 элементами не откажет ни одного элемента, равна 0,05. Считая вероятность отказа редким событием для одного элемента, найти среднее число элементов, отказавших за время t.

Ответ: 3.

27. Вероятность безотказной работы изделия в течение 120 ч составила 0,9. Найти интенсивность и частоту отказов, предполагая, что закон надежности экспоненциальный.

Ответ: $8{,}87\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $7{,}9\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$.

28. Время работы радиоизделия до отказа подчинено закону Релея. Найти вероятность безотказной работы и частоту отказа за 500 ч, если σ=1 000 ч.

Ответ: 0,8825; $0{,}44\cdot10^{-3}$ч$^{-1}$.

29. Время безотказной работы электронного прибора подчинено закону Релея с параметрами σ=1 860 ч. Требуется рассчитать: вероятность безотказной работы электронного прибора за время t=1 000 ч; частоту отказа; интенсивность отказов; среднюю наработку до первого отказа.

Ответ: 0,865; $2{,}5\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $2{,}9\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; 2331 ч.

30. Время исправной работы радиоизделия подчинено закону Вейбулла с параметрами k=2,6; $\lambda_0=1{,}65\cdot10^{-7}$ ч$^{-1}$. Найти вероятность безотказной работы радиоизделия в течение 150 ч.

Ответ: 0,9277.

31. Найти интенсивность отказов радиоизделия за 150 ч, если время исправной работы радиоизделия подчинено закону Вейбулла с параметрами k=3 и $\lambda_0=1{,}8\cdot10^{-7}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 0,01215 $ч^{-1}$.

32. Известно, что интенсивность отказов компонентов, случайное время исправной работы которых подчинено закону Вейбулла, равно $\lambda(t)=5 \cdot 10^{-5}ч^{-1}$ за 1 000 ч при k=0,6. Найти вероятность безотказной работы за это время.

    Ответ: 0,92.

33. Вероятность безотказной работы узла за 100 ч равна 0,9. Считая, что время исправной работы подчинено закону Вейбулла с k=2,0, найти $\varphi(t)$.

    Ответ: $8{,}53 \cdot 10^{-4}$ $ч^{-1}$.

34. При проведении испытаний изделия получена зависимость интенсивности отказов от времени (рис. 3.4). Найти: вероятность безотказной работы в течение 1 000 ч; частоту отказов; среднюю наработку до первого отказа.

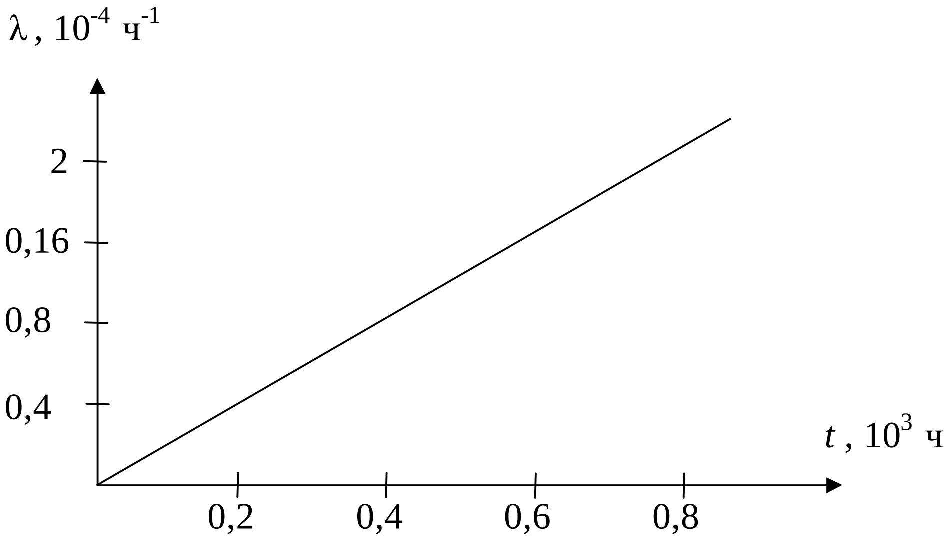


Рис. 3.4

Ответ: 0,9048; 2 800 ч.

35. Для электромеханического изделия известно, что случайное время работы подчиненное гамма-распределению с параметрами k=0,8 и $\lambda_0=5 \cdot 10^{-5}ч^{-1}$. Найти показатели надежности за 1 000 ч.

    Ответ: $2{,}38 \cdot 10^{-6}$ $ч^{-1}$; 0,9988; 40 000 ч.

36. Систематическая ошибка измерения частоты f прибора составляет 50 Гц в сторону занижения результата, а случайная составляющая погрешности подчинена нормальному со среднеквадратическим отклонением σ =100 Гц.

Найти вероятность измерения частоты с ошибкой, не превосходящей по абсолютной величине 150 Гц. [5].

Решение

Вероятность попадания частоты *f* в заданный интервал
$\gamma =$ (-150Гц,+150Гц) имеет вид

$$P_\gamma = P(-150\text{Гц} \le \Delta\text{f} \le 150\text{Г5}) = \Phi(\frac{150+50}{100}) - \Phi(\frac{-150+50}{100}) =$$
$$= \Phi(2) - \Phi(-1) = \Phi(2) + \Phi(1) = 0{,}4772 + 0{,}3714 = 0{,}8186.$$

Значение интеграла вероятности взято из приложения.

37. При испытании резисторов номиналом 1 кОм установлено, что систематическая погрешность составляет 2 % в сторону увеличения, а распределение случайной погрешности номинальных сопротивлений подчиненного нормальному закону с σ =120 Ом. Найти вероятность измерения сопротивления с ошибкой, не превосходящей по абсолютной величине 100 Ом от номинального значения.

Ответ: 0,6294.

38. Случайное время исправной работы подчинено распределению Вейбулла с k=1,5 и λ_0=$5 \cdot 10^{-4}$ч$^{-1}$. Найти среднее время исправной работы.

Ответ: 143 ч.

39. Измерение дальности с помощью РЛС выполняется с некоторой погрешностью. Систематическая ошибка измерения составляет 50 в сторону занижения дальности. Случайная составляющая погрешности подчиняется нормальному закону со среднеквадратическим отклонением σ =150 м. Найти вероятность измерения дальности с ошибкой, не превосходящей по абсолютной величине 200 м.

Ответ: 0,7938.

40. Определить среднеквадратическую погрешность амперметра. Систематической ошибки он не имеет, случайная погрешность распределения по нормальному закону, причем с вероятностью 0,95 она не выходит за пределы $\pm 20\%$ от номинального значения 10 мА.

Ответ: 1,375 мА.

4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ НАДЕЖНОСТИ РЭС

В инженерной практике для получения предварительных оценок надежности РЭС широкое применение получили структурные модели надежности, представляющие собой графическое изображение РЭС (в виде структурных схем), в которых выделены элементы и связи, выполняющие основные функции данного устройства. Наиболее простыми и информативными моделями надежности являются графические. Они составляются следующим образом:

1) после исследования функционирования изучаемой системы выявляют возможные отказы ее элементов и оценивают их влияние на работоспособность РЭС;

2) исследуемую РЭС расчленяют таким образом, чтобы отдельные ее части были независимы в отношении отказов.

Каждая часть РЭС (компонент модели надежности) может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. При составлении модели надежности функциональные и электрические связи между отдельными частями РЭС заменяют логическими, характеризующими безотказную работу радиоизделия, причем в модель его надежности включают лишь элементы, необходимые для выполнения основной функции изделия. Наиболее универсальными моделями надежности являются последовательные и параллельные соединения компонентов, а также их сочетания – смешанное соединение. Рассмотрим основные свойства этих моделей.

4.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ

Последовательная модель надежности, (рис. 4.1) состоит из нескольких частей РЭС (не менее двух), соединенных последовательно. Ее характерная особенность в том, что отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всего соединения в целом.

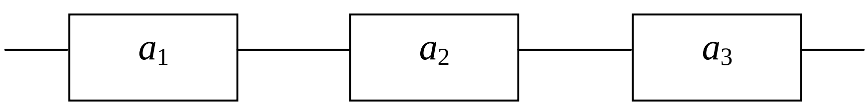


Рис. 4.1

Если относительно компонентов модели надежности РЭС сделаны следующие допущения: выходы из строя элементов не зависят друг от друга, отказы элементов являются случайными событиями, отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы, отказавшие элементы не восстанавливаются, то, согласно теореме умножения вероятностей, вероятность безотказной работы всего радиоизделия $P_с(t)$ запишется в следующем виде:

$$P_с(t) = \prod_{i=1}^{N} p_i(t), \tag{4.1}$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го элемента (i = 1..N); N – число элементов.
Тогда вероятность отказа за время t

$$Q_{\text{с}}(t) = 1 - P_{\text{с}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N} p_i(t), \tag{4.2}$$

а средняя наработка до первого отказа

$$T_{\text{с}} = \int_0^{\infty} P_{\text{с}}(t)dt, \tag{4.3}$$

Конкретизируем соотношение (4.1), выразив характеристики элементов через наиболее распространенный показатель надежности λ. Подставляя (2.22) в (4.1), получаем

$$P_{\text{с}}(t) = \exp(-\sum_{i=1}^{N}\int_0^t \lambda_i(t)dt)\,. \tag{4.4}$$

Если имеется большое число однотипных компонентов с примерно одинаковой надежностью и число типов s при количестве элементов N_j в каждом типе (j = 1..s), то (4.4) примет вид

$$P_{\text{с}}(t) = \exp(-\sum_{j=1}^{s} N_j \int_0^t \lambda_j(t)dt)\,. \tag{4.5}$$

Формулы (4.4), (4.5) являются общими формулами надежности РЭС, справедливыми при любых $\lambda_i(t)$. Для случая нормальной эксплуатации, когда $\lambda_i(t) = \lambda_i$ = const и справедлив экспоненциальный закон надежности, они примут вид

$$P_{\text{с}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{с}} t) = \exp(-t\sum_{i=1}^{N}\lambda_i)\,, \tag{4.6}$$

$$P_{\text{с}} = \exp(-\lambda_{\text{с}} t) = \exp(-t\sum_{j=1}^{s} N_j\lambda_j), \tag{4.7}$$

откуда следует, что

$$\lambda_{\text{с}}(t) = \sum_{i=1}^{N}\lambda_i; \tag{4.8}$$

$$\lambda_{\text{с}} = \sum_{j=1}^{s} N_j\lambda_j. \tag{4.9}$$

В силу соотношения (2.25) среднее время безотказной работы

$$T_{\text{с}} = 1\Big/\sum_{i=1}^{N}\lambda_i \tag{4.10}$$

$$T_{\text{с}} = 1\Big/\sum_{j=1}^{S} N_j\lambda_j \tag{4.11}$$

При оценке надежности РЭС с неодновременно работающими элементами удобно использовать показатель надежности $A = \lambda t$. Обозначая $A_с = \lambda_с t_с$ и $A_i = \lambda_i t_i$, имеем

$$A_с = \sum_{i=1}^{N} A_i, \tag{4.12}$$

$$A_с = -\ln P_с(t). \tag{4.13}$$

Формулы (4.7) – (4.13) широко используются при расчете надежности для последовательного, или, как его часто называют, основного соединения элементов РЭС.

4.2. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ

Параллельная модель надежности отображает РЭС из двух или более блоков, соединенных параллельно (рис. 4.2).

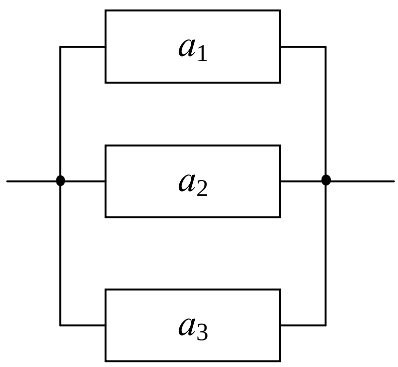


Рис. 4.2.

Особенность этой модели заключается в том, что реальная система РЭС работоспособна, если хотя бы один из блоков исправен. Поскольку отказ РЭС наступает только при отказе всех элементов входящих в нее, то, предполагая отказы независимыми, получаем

$$Q_с(t) = \prod_{i=1}^{m} q_i(t), \tag{4.14}$$

где $Q_с(t)$ – вероятность отказа системы; $q_i(t)$ – вероятность отказа i-го элемента. Тогда вероятность безотказной работы

$$P_с(t) = 1 - Q_с(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} [1 - p_i(t)]. \tag{4.15}$$

Если надежности частей (блоков, элементов) подчиняются экспоненциальному закону, то результирующая надежность уже не будет экспоненциальной. Действительно, если $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, то из (4.15) имеем

$$P_{\text{с}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m}(1 - e^{-\lambda_i t}). \quad (4.16)$$

Если $\lambda_i t << 1$, то $1 - e^{-\lambda_i t} \approx \lambda_i t$ и $P_{\text{с}}(t) \approx e^{-t^m \prod_{i=1}^{m} \lambda_i}$. Откуда видно, что интенсивности отказов для высоконадежных элементов перемножаются (характерно для закона Вейбулла). Соотношения (4.14) и (4.15) используются для оценки надежности РЭС с общим, поэлементным и смешанным резервированием.

4.3. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Смешанным соединением называется сочетание параллельного и последовательного типов соединений.

В инженерной практике при оценке надежности РЭС наблюдаются случаи, когда условия работоспособности исследуемой исходной РЭС не дают возможности сразу представить ее простейшими параллельно-последовательными структурными логическими схемами надежности, которые легко преобразуются. В связи с этим существуют методы адекватной замены сложных схем надежности более простыми эквивалентными. Рассмотрим один из наиболее простых способов преобразования сложных структур.

4.4. МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПО БАЗОВОМУ ЭЛЕМЕНТУ

Этот метод основан на теореме о сумме вероятностей несовместных событий. Суть его состоит в следующем. В исходной структуре (рис. 4.3) выбирают базовый такой элемент, который не дает возможности представить сложную структуру в виде сочетания простейших. На рис. 4.3 вероятность его безотказной работы обозначена через $P_{\text{б}}(t)$.

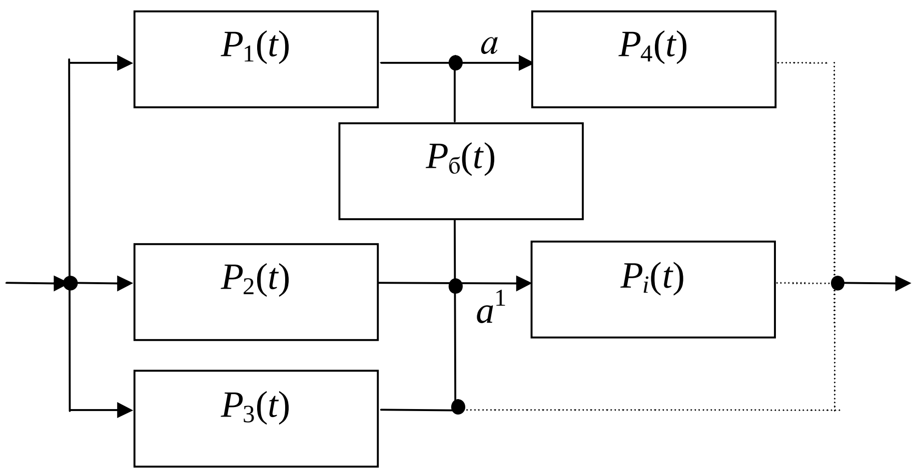
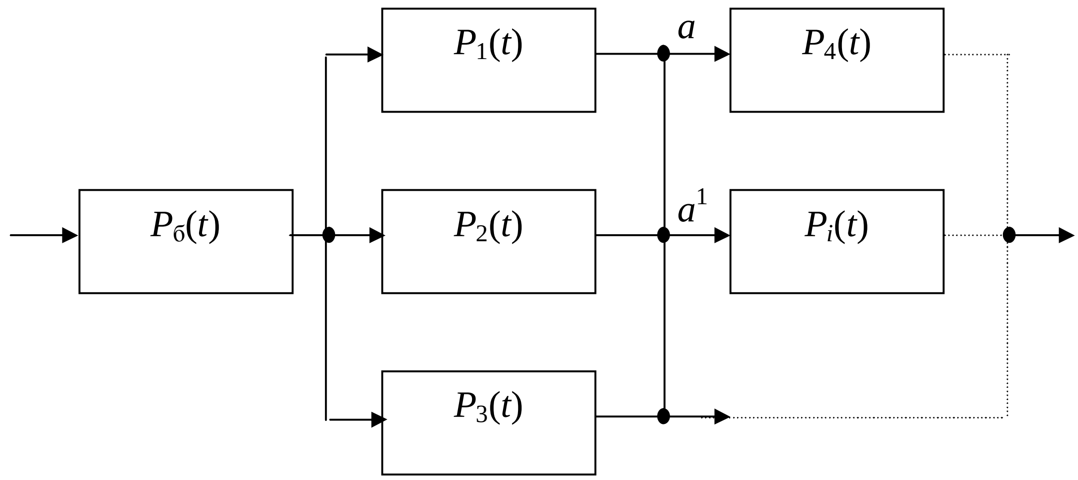
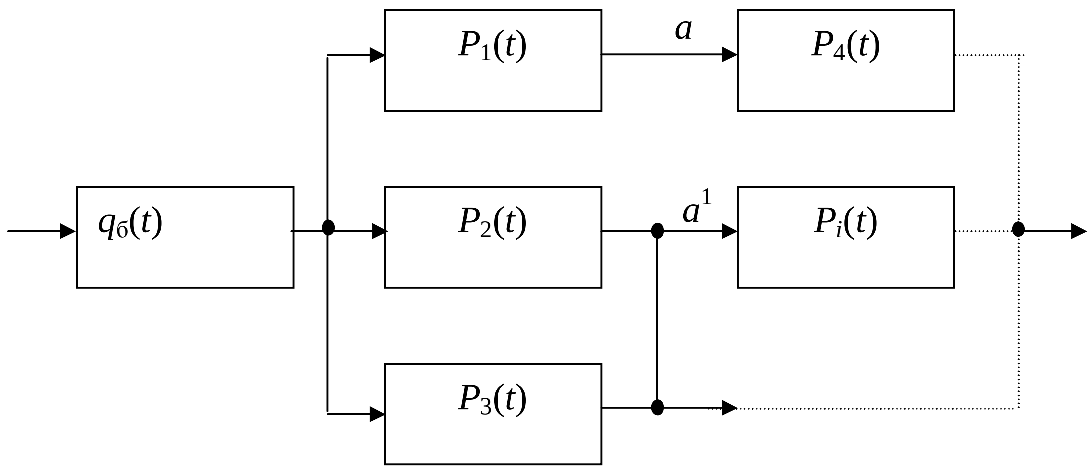


Рис. 4.3.

Рассматривают два крайних состояния базового элемента: а) базовый элемент находится в работоспособном состоянии и обладает абсолютной проводимостью сигнала; б) базовый элемент находится в состоянии отказа, и сигнал через него вообще не проходит. Состояние а) имитируется в эквивалентной схеме (рис. 4.4, *а*) коротким замыканием цепи a-a^1 с базовым элементом, а состояние б) представляется разрывом той же цепи a-a^1 во второй эквивалентной схеме (рис. 4.4, *б*). Для адекватности полученных эквивалентных схем (рис. 4.4) исходной (рис. 4.3) к первой схеме последовательно включают элемент с вероятностью безотказной работы $P_б(t)$, а ко второй – элемент с вероятностью отказа $q_б(t)$.



а)



б)

Рис. 4.4

Для полученных эквивалентных параллельно-последовательных схем надежности (рис. 4.4) определяют вероятности безотказной работы $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Тогда вероятность безотказной работы исходной структуры $P_c(t)$ (рис. 4.3) будет равна сумме вероятностей, поскольку принятые нами состояния а) и б), в которых может находиться базовый элемент, несовместны:

$$P_{c}(t) = P_{1}(t) + P_{2}(t). \qquad (4.17)$$

4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как определяется вероятность безотказной работы при последовательной модели надежности?
2. Как определяется вероятность безотказной работы при параллельной модели надежности?
3. Когда используется метод базового элемента для определения вероятности безотказной работы устройства?
4. Прибор состоит из n блоков, причем выход из строя любого из них приводит к отказу прибора. Блоки выходят из строя независимо друг от друга. Какую модель надежности необходимо использовать для определения надежности устройства, чему равна вероятность исправной работы всего прибора, если надежность каждого блока P равна 0,9 , а число блоков равно пяти?

   Ответ: 0,59.

5. Прибор состоит из n блоков. Отказ прибора произойдет при выходе из строя первого блока и одновременном выходе из строя всех остальных блоков. Какую модель надежности необходимо использовать для определения надежности устройства, чему равна вероятность исправной работы всего прибора, если надежность каждого блока P равна 0,9, а число блоков равно пяти.

   Ответ: 0,899.

6. Построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы при электрическом соединении элементов, приведенном на рис. 4.5. Тип отказа резисторов – тепловая деструкция. Считать все элементы равно надежными с вероятностью безотказной работы 0,95.

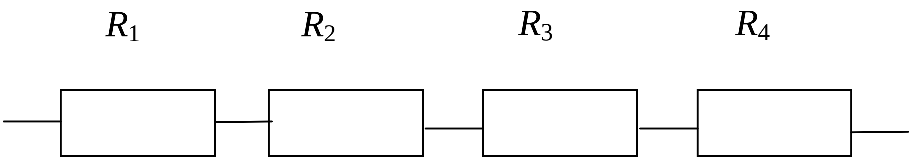
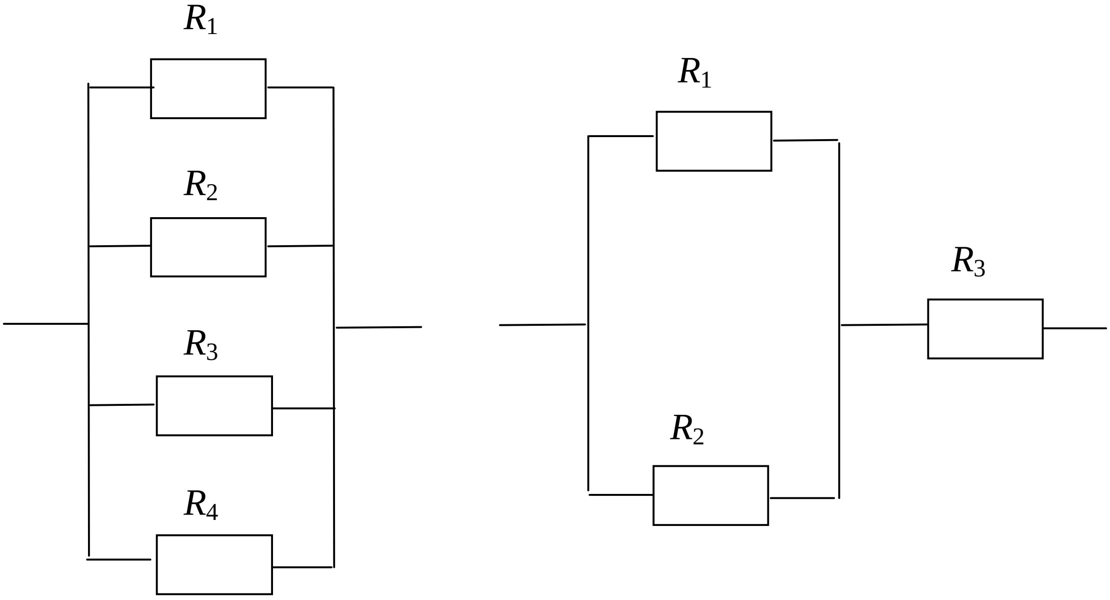


Рис. 4.5

Ответ: 0,815.

7. Используя условие задачи 6, построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы при электрическом соединении элементов, показанном на рис. 4.6.



а) б)

Рис. 4.6

Ответ: 0,999; 0,948.

8. Построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы при электрическом соединении элементов, показанном на рис. 4.7. Тип отказа конденсаторов – короткое замыкание. Все элементы равно надежны и вероятность безотказной работы 0,9.

Рис. 4.7

Ответ: 0,9999.

9. По условию задачи 8 для соединения элементов , приведенного на рис. 4.8, построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы.

Ответ: 0,656.

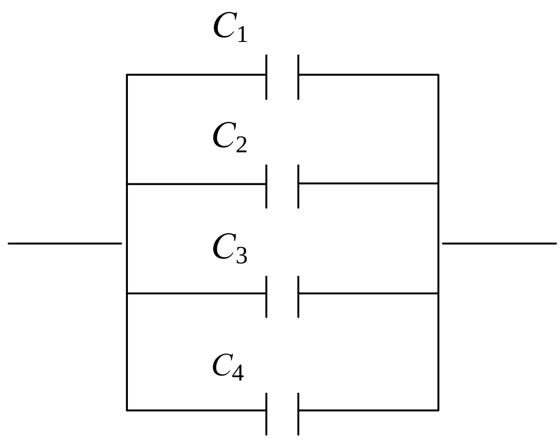


Рис. 4.8

10. По условиям задач 6 и 8 построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы при электрическом соединении элементов, изображенном на рис. 4.9.

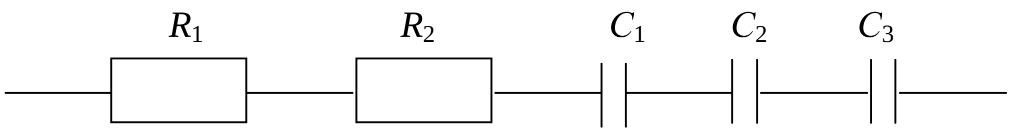


Рис. 4.9

Ответ: 0,902

11. По условиям задач 6 и 8 построить модель надежности и определить вероятность безотказной работы при электрическом соединении элементов, приведенном на рис. 4.10.

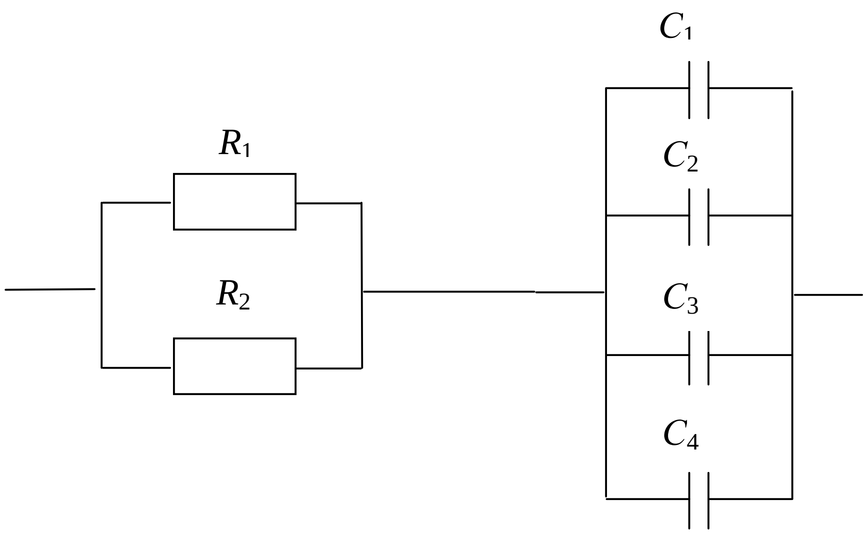


Рис. 4.10

Ответ: 0,654.

12. По структурным моделям надежности (рис. 4.11) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

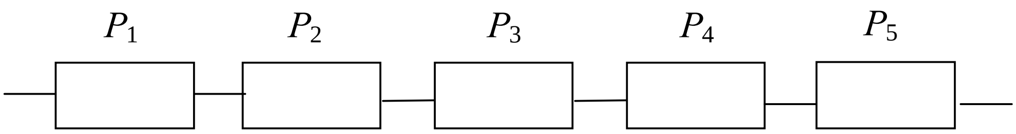


Рис. 4.11

Ответ: 0,566.

13. По структурным моделям надежности (рис. 4.12) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

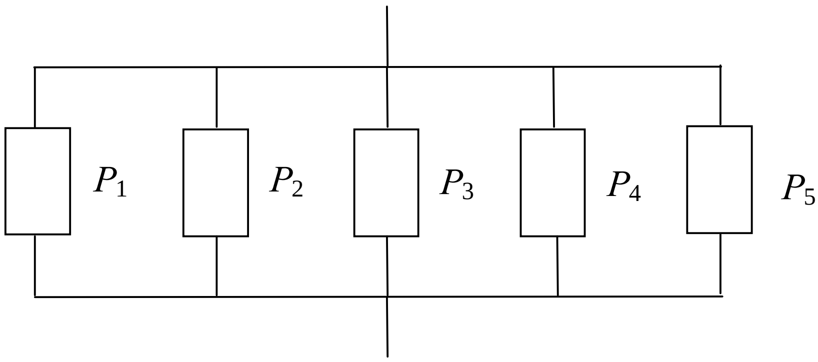


Рис. 4.12

Ответ: 0,999992.

14. По структурным моделям надежности (рис. 4.13) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

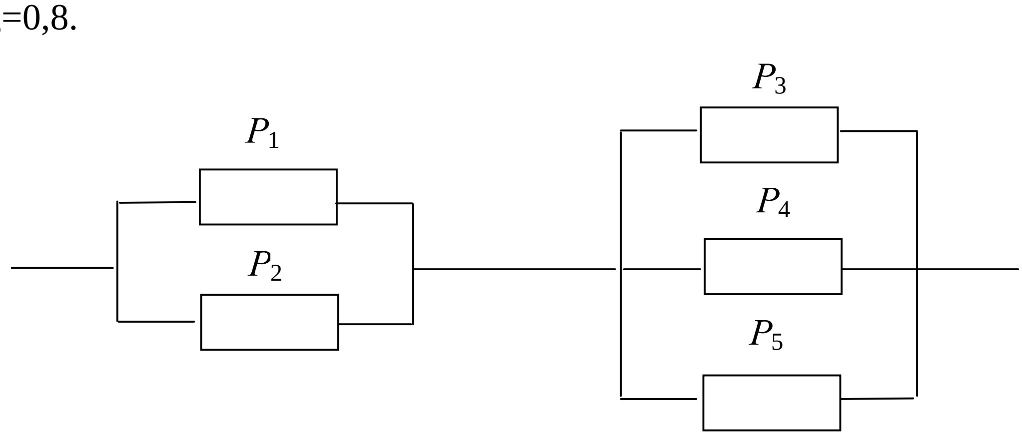


Рис. 4.13

Ответ: 0,993.

15. По структурным моделям надежности (рис. 4.14) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

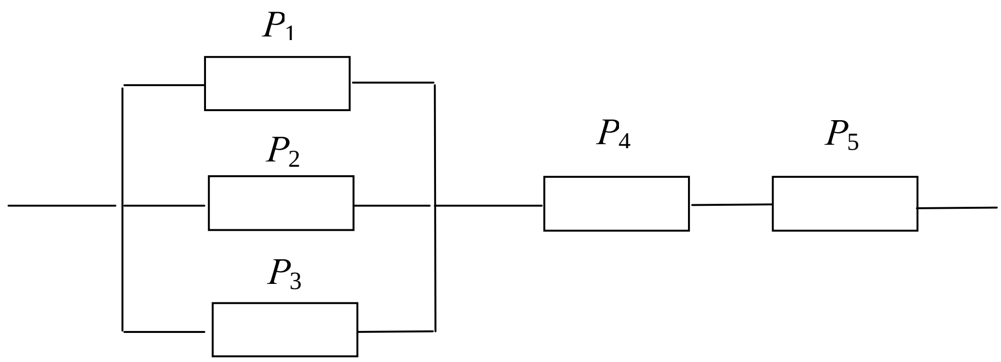


Рис. 4.14

Ответ: 0,720.

16. По структурным моделям надежности (рис. 4.15) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

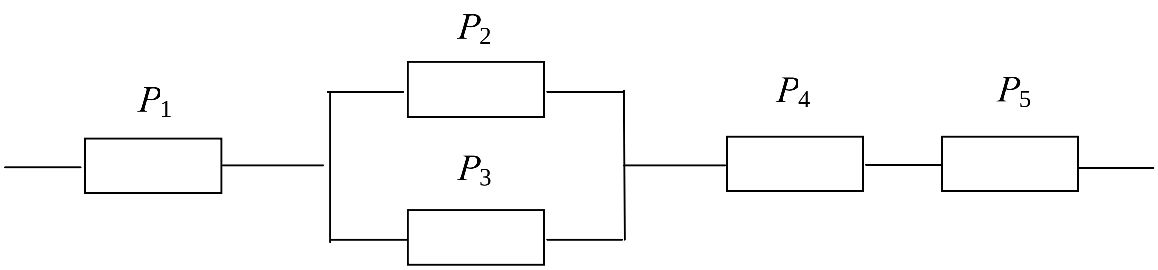


Рис. 4.15

Ответ: 0,679.

17. По структурным моделям надежности (рис. 4.16) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие: P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

Ответ: 0,924.

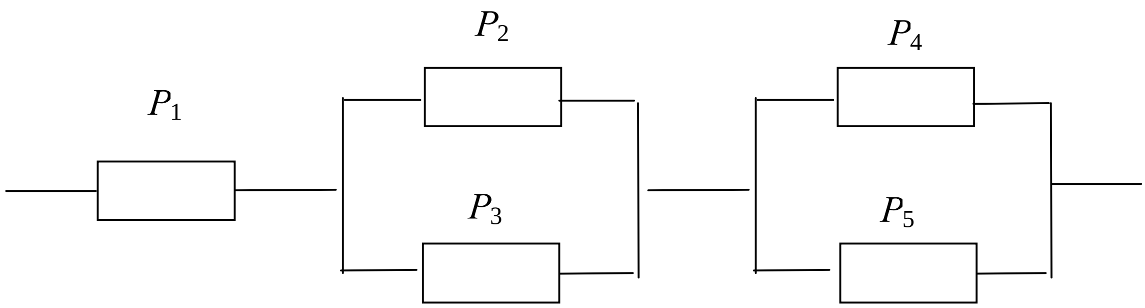


Рис. 4.16

Ответ: 0,924.

18. По структурным моделям надежности (рис. 4.17) определить вероятность безотказной работы устройств. Значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы следующие:
P_1=0,95; P_2=0,9; P_3=0,92; P_4=0,9; P_5=0,8.

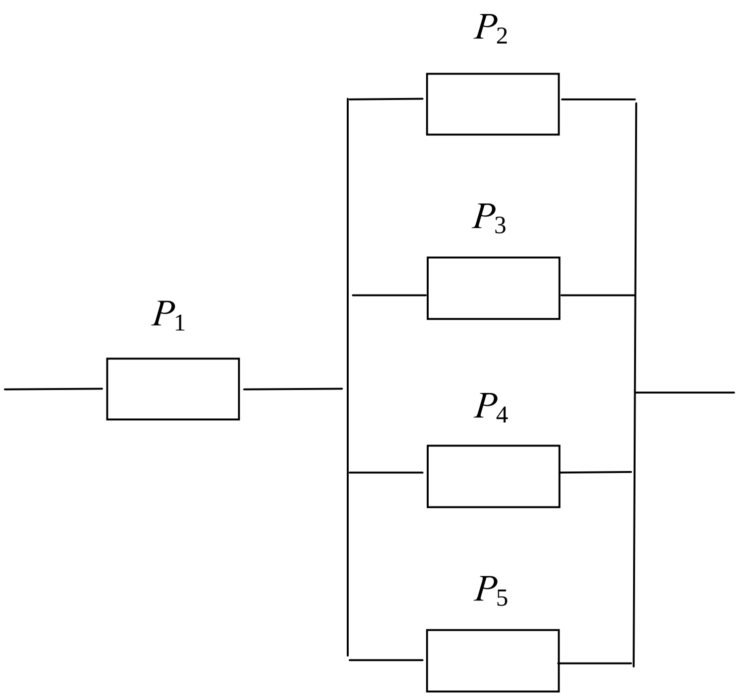


Рис. 4.17

Ответ: 0,950.

19. РЭС состоит из трех блоков, имеющих интенсивности отказов $\lambda_1 = 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $\lambda_2 = 10^{-5}$ ч$^{-1}$; $\lambda_3 = 10^{-4}$ ч$^{-1}$. Известно, что второй и третий блок проработали по 100 и 200 ч соответственно. Первый элемент работал исправно в течение времени t = 300 ч. Найти вероятность безотказной работы системы за 300 ч.

Ответ: 0,967.

20. Система состоит из пяти приборов, причем отказ любого из них ведет к отказу системы. Известно, что первый прибор отказал 34 раза за 952 ч, второй 24 раза в течение 960 ч работы, остальные в течении 210 ч работы отказали 4, 6 и 5 раз соответственно. Требуется определить вероятность отказа системы за 100 ч, если справедлив экспоненциальный закон надежности для каждого прибора [4].

Решение

Используем соотношение (4.10), для этого:

1) определим интенсивность отказов для каждого прибора:

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{34}{952} = 0{,}0357 \text{ ч}^{-1}; \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{24}{960} = 0{,}025 \text{ ч}^{-1};$$

$$\bar{\lambda}_{3,4,5} = \frac{4+6+5}{210} = 0{,}0714 \text{ ч}^{-1};$$

2) интенсивность отказа системы будет

$$\bar{\lambda}_\text{c} = 0{,}0357 + 0{,}025 + 0{,}0714 = 0{,}1321 \text{ ч}^{-1};$$

3) вероятность отказа системы

$$Q = 1 - P = 1 - e^{-\bar{\lambda}_\text{c} t} = 1 - e^{-0{,}1321 \cdot 100} = 0{,}0000018.$$

21. Структурная модель надежности РЭС имеет вид, представленный на рис. 4.11. Вероятность отказа отдельных частей: $q_1 = 0{,}1$; $q_2 = 0{,}01$; $P_3 = 0{,}8$. Определить вероятность отказа РЭС.

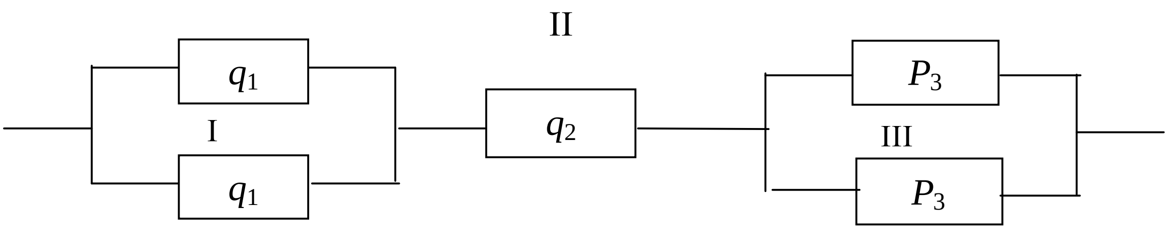


Рис. 4.11

Решение

Представляя схему в виде последовательного соединения трех узлов I, II, III, запишем вероятность отказа каждого узла:

$$P_\text{I} = 1 - q_1^{\,2}; \quad P_\text{II} = 1 - q_2; \quad P_\text{III} = 1 - (1 - p_3)^2.$$

Тогда $$P_{\text{c}} = P_{\text{I}} P_{\text{II}} P_{\text{III}} = \left(1 - q_1^2\right)\left(1 - q_2\right)\left[1 - \left(1 - p_3\right)^2\right] =$$
$$= \left(1 - 0{,}1^2\right)\left(1 - 0.01\right)\left[1 - \left(1 - 0{,}8\right)^2\right] = 0{,}9314.$$

22. Структурная модель надежности представлена на рис 4.12. Определить вероятность безотказной работы системы, если P_1=0,9; P_2=0,85; P_3=0,95; P_4=0,9.

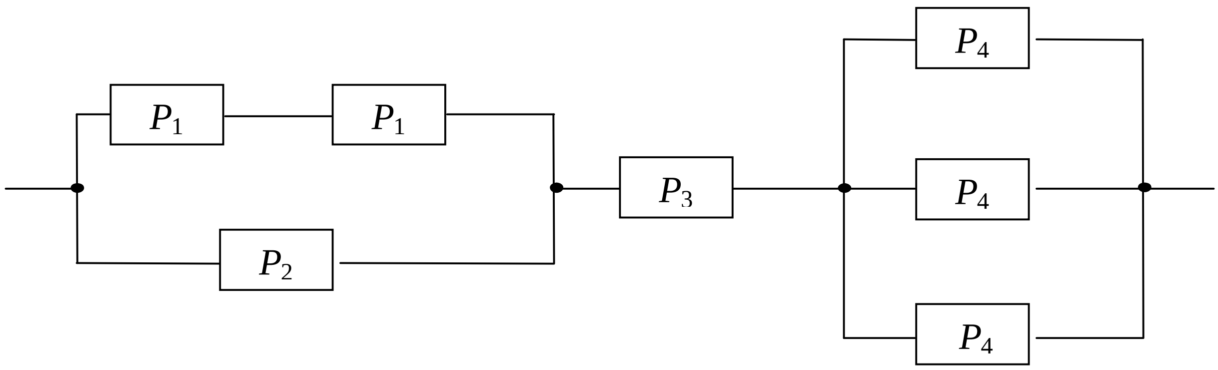


Рис. 4.12

Ответ: 0,92 ч.

23. Структурная модель надежности РЭС имеет вид, представленный на рис. 4.13. Интенсивность отказов блоков: $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $\lambda_2 = 2{,}5 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $\lambda_3 = 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $\lambda_4 = 10^{-5}$ ч$^{-1}$. Найти вероятность безотказной работы РЭС за время 100 ч.

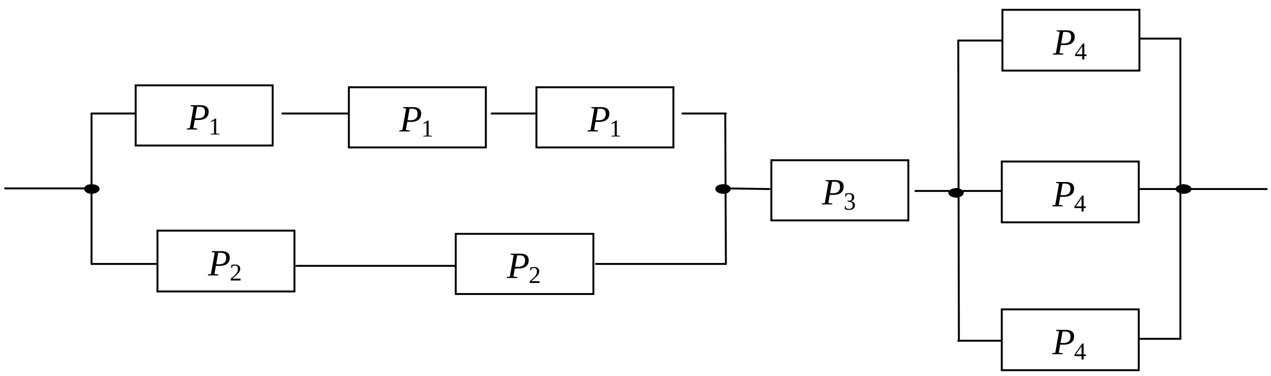


Рис. 4.13

Ответ: 0,999887.

24. Прибор содержит два блока, соединенных последовательно. Вероятность отказов этих блоков $q_1 = 0{,}11$; $q_2 = 0{,}33$ соответственно. Найти вероятность исправной работы прибора, если P=0,9.

Ответ: 0,73.

25. Структурная модель надежности блока имеет вид, представленный на рис. 4.14. Найти вероятность отказа блока, если надежность всех узлов одинакова и равна 0,8 .

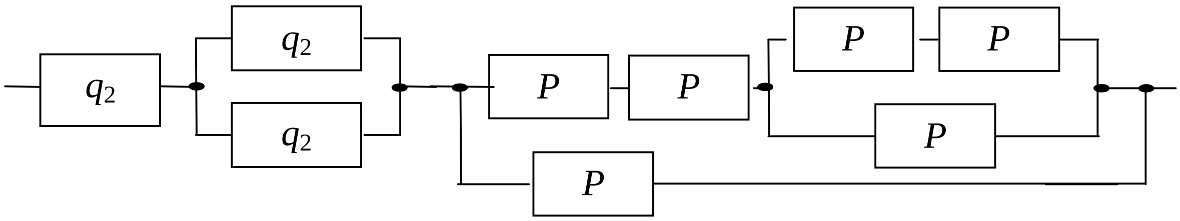


Рис. 4.14

Ответ: 0,706.

26. Найти вероятность безотказной работы системы, структурная модель надежности которой приведена на рис. 4.15. Известно, что $P_i = 0{,}95 \left(i = \overline{1{,}5}\right)$ [5].

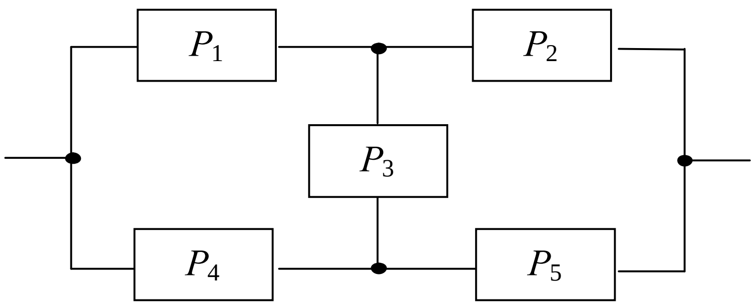


Рис. 4.15

Решение

Для решения используем метод базового элемента. За базовый элемент принимаем элемент P_3. Заменим схему двумя эквивалентными (рис. 4.16) и определяем вероятность безотказной работы каждой из них.

Для схемы 4.16, *а* имеем вероятность безотказной работы P_{I} для равнонадежных элементов: $P_{\text{I}} = P\left\{ 1 - [1 - P]^2 \right\}^2$.

Для схемы 4.16, *б* вероятность безотказной работы

$$P_{\text{II}} = [1 - P]\left\{ 1 - \left[1 - P^2\right]^2 \right\}.$$

Тогда будем иметь

$$P_{\text{с}} = P_{\text{I}} + P_{\text{II}} = P\left\{1-[1-P]^2\right\}^2 + [1-P]\left\{1-\left[1-P^2\right]^2\right\} =$$
$$= 0{,}95\left[1-(1-0{,}95)^2\right]^2 + (1-0{,}95)\left[1-(1-0{,}95^2)^2\right] = 0{,}9947.$$

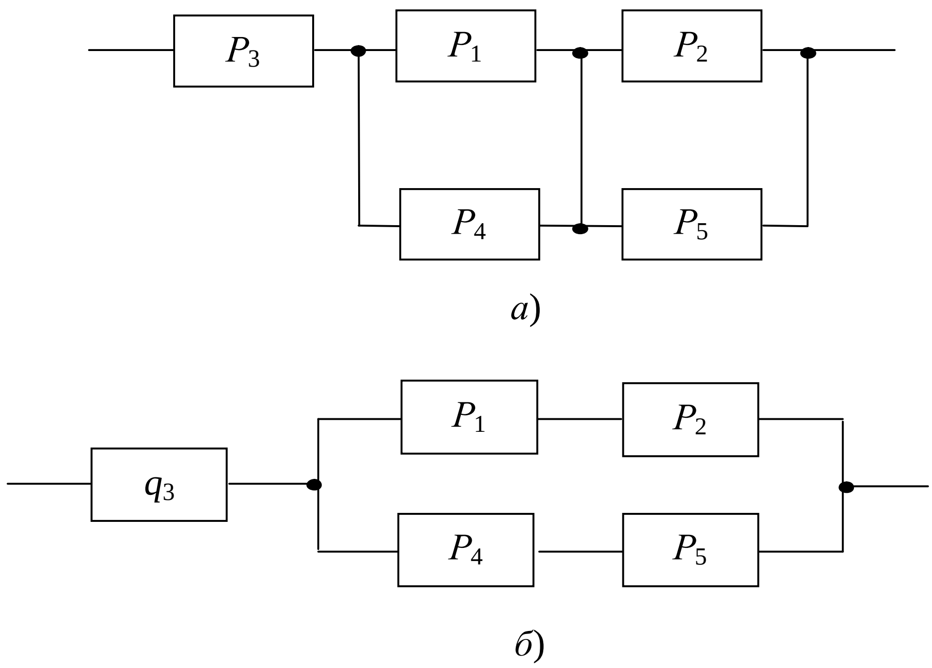


Рис. 4.16

27. Найти вероятность безотказной работы системы, структурная модель надежности которой приведена на рис. 4.17. Вероятность безотказной работы узлов одинакова $P = 0{,}9$.

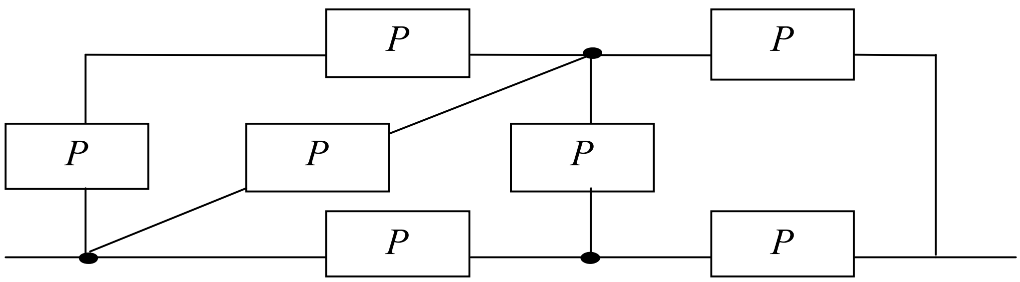


Рис. 4.17

Ответ: 0,98919.

28. Найти вероятность безотказной работы устройства, структурная модель надежности которого приведена на рис. 4.18.
Вероятности безотказной работы узлов: $P_1 = 0{,}9$; $P_2 = 0{,}8$.

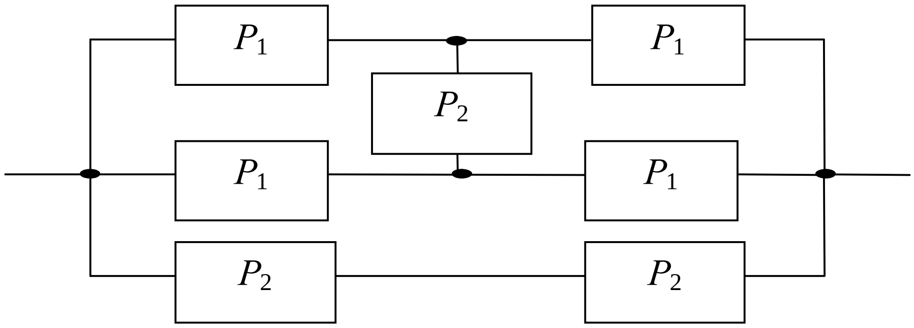


Рис. 4.18

Ответ: 0,992.

29. Найти вероятность безотказной работы системы за 100 ч, структурная модель надежности которой приведена на рис. 4.18. Известны интенсивности отказов узлов $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$; $\lambda_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$.

Ответ: 0,999.

30. Найти вероятность безотказной работы прибора, структурная модель надежности которого приведена на рис. 4.19. Известны вероятности безотказной работы узлов: $P_1 = 0{,}8$; $P_2 = 0{,}85$.

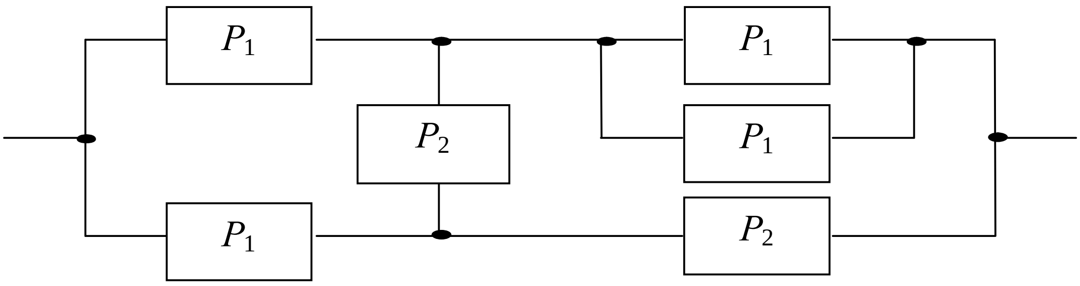


Рис. 4.19

Ответ: 0,950.

31. Найти вероятность безотказной работы системы, структурная модель надежности которой приведена на рис. 4.20. Известно, что P_1=0,7; P_2=0,8.

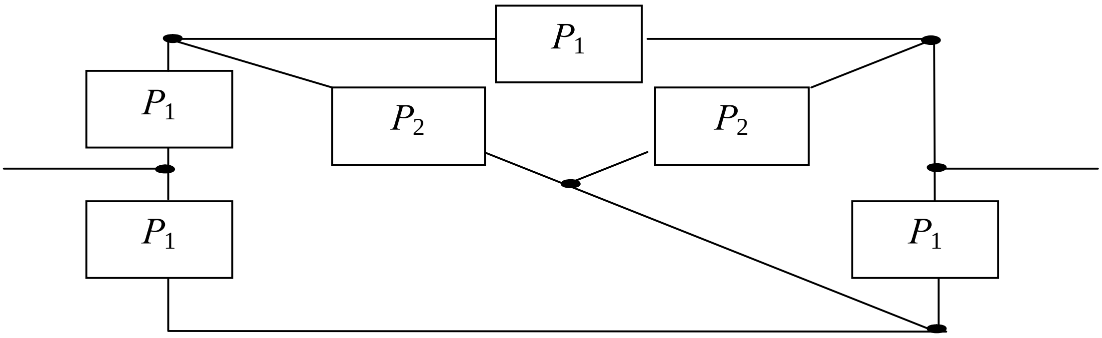


Рис. 4.20

Ответ: 0,880.

32. Структурная модель надежности блока имеет вид, представленный на рис. 4.21. Вероятность безотказной работы элементов схемы одинакова и равна 0,9 за 1 000 ч. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Найти среднюю наработку до первого отказа устройства.

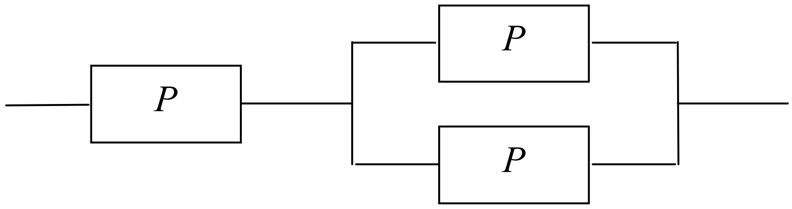


Рис.4.21

Решение

Определим вероятность безотказной работы схемы, приведенной на рис. 4.21. Соединение элементов по надежности смешанное (последовательно – параллельное), поэтому $P_С$ блока имеет вид

$$P_с = P[1-(1-P)^2] = P[1-(1-2P+P^2)] =$$
$$= P\left(2P - P^2\right) = 2P^2 - P^3.$$

Поскольку справедлив экспоненциальный закон надежности, то $P = e^{-\lambda t}$. Соответственно $P_с = 2e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}$.

Найдем среднюю наработку до первого отказа, используя формулу (2.24):

$$T_{ср} = \int_0^\infty P_с(t)dt = \int_0^\infty \left(2e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}\right)dt = \frac{2}{3\lambda},$$

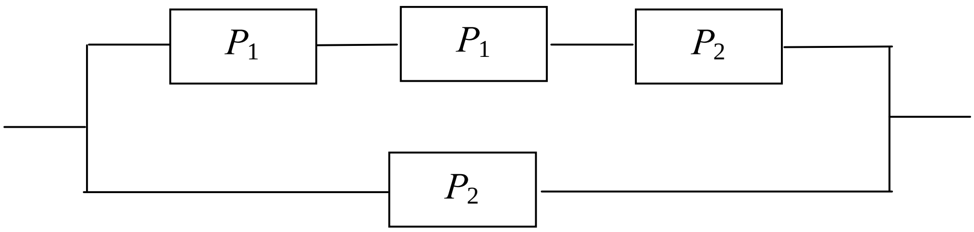
где λ - интенсивность отказов элементов структурной схемы надежности.

Определим значение λ, логарифмируя выражение 3.9: $\lambda = -\dfrac{\ln P(t)}{t}$.

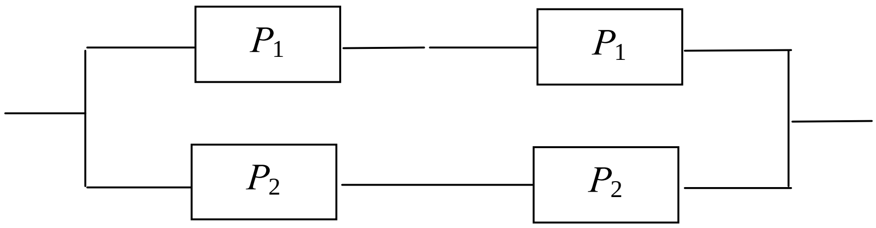
$$\lambda = -\frac{\ln 0{,}9}{1000} = \frac{0{,}1054}{1000} = 0{,}1054 \cdot 10^{-3} ч^{-1}. \quad T_{ср} = \frac{2}{3 \cdot 0{,}1054 \cdot 10^{-3}} = 6325 \text{ ч.}$$

33. Структурные модели надежности блока приведены на рис. 4.22. Вероятность безотказной работы элементов подчиняется экспоненциальному закону и составляет P_1=0,95; P_2=0,9 за 1 000 ч. Найти среднюю наработку до первого отказа для каждой модели.

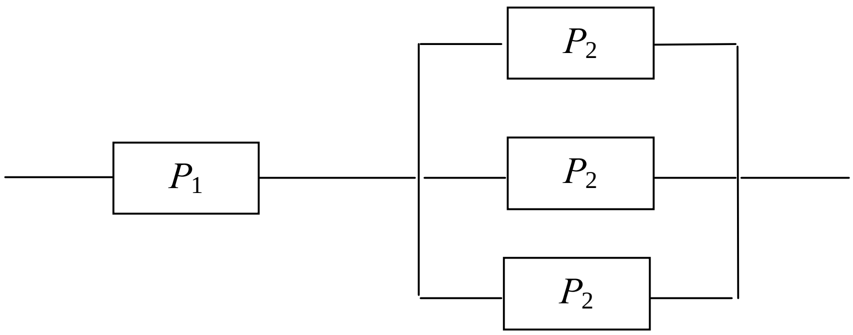
а)



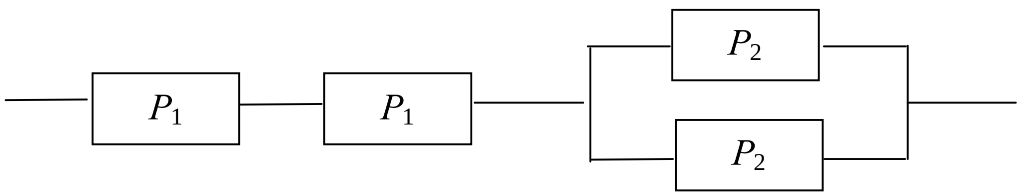
б)



в)



г)



д)

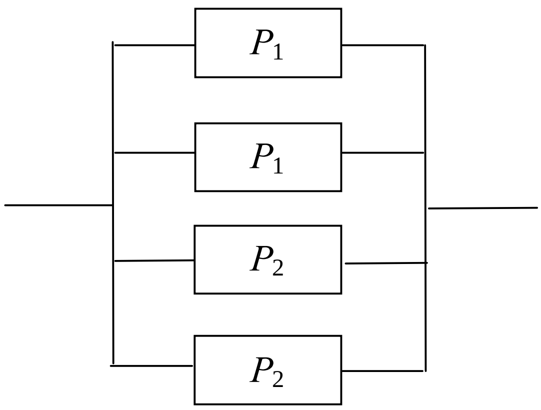


Рис. 4.22

Ответ: а)16 493 ч; б) 11 493 ч; в) 9 000 ч; г) 6 667 ч; д) 34 132 ч.

34. Определить интенсивность отказов системы, структурная модель надежности которой имеет вид, приведенный на рис. 4.21. Вероятность безотказной работы элементов подчиняется экспоненциальному закону, одинакова и за 1 000 ч составляет 0,95.

Решение

Определим вероятность безотказной работы системы, приведенной на рис. 4.21. Значение $P_с$ найдено в задаче 20 $P_с(t) = 2e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}$.

Определим интенсивность отказов системы, используя 2.21:

$$\lambda_с(t) = -\frac{dP(t)}{dt}\cdot\frac{1}{P(t)} = -\frac{4\lambda e^{-2\lambda t} - 3\lambda e^{-3\lambda t}}{P_с}.$$

Подставим значения интенсивности отказов элементов, определенные в задаче (11):

$$\lambda_с(t) = \frac{4\cdot 0{,}154\cdot 10^{-3} e^{-2\cdot 0{,}154} - 3\cdot 0{,}154\cdot 10^{-3} e^{-3\cdot 0{,}154}}{0{,}891} =$$

$$= \frac{0{,}16\cdot 10^{-3}}{0{,}891} = 0{,}179\cdot 10^{-3}\,ч^{-1}.$$

35. Определить интенсивность отказов блока, структурные модели надежности которого приведены на рис. 4.22.

5. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ РЭС

Резервированием называют применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. Резервирование – одно из средств обеспечения заданного уровня надежности объекта при наличии недостаточно надежных радиоэлементов, что особенно важно для обеспечения безотказности РЭС.

Цель резервирования – обеспечение отказоустойчивости объекта в целом, т.е. сохранение его работоспособности, когда возник отказ одного или нескольких элементов. Отношение числа z запасных элементов системы к числу ее основных элементов при минимальной функциональной структуре называется ***кратностью резервирования***. Очевидно, что кратность резервирования

$$r = \frac{z}{n} = \frac{N-n}{n} = m-1,$$

где N – число всех элементов системы (основных и запасных); m – порядок резервирования $(m = N/n)$.

Эффект от введения резерва будем характеризовать коэффициентом повышения надежности G. Разновидности G [4] по вероятности безотказной работы, по вероятности отказа, по среднему времени безотказной работы, по интенсивности отказов определяются по формулам:

$$G_{\text{р}} = \frac{P_{\text{рез}}}{P_{\text{нер}}}; \quad G_Q = \frac{Q_{\text{нер}}}{Q_{\text{рез}}}; \quad G_{\text{т}} = \frac{T_{\text{рез}}}{T_{\text{нер}}}; \quad G_\lambda = \frac{\lambda_{\text{нер}}}{\lambda_{\text{рез}}}.$$

5.1. ОБЩЕЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Модель резервированной РЭС состоит из основной и m-1 резервных схем (рис. 5.1). Пусть каждая система содержит по n элементов, тогда в соответствии с соотношениями (4.1) и (4.2) вероятность безотказной работы основной системы $P_{\text{с}1}(t)$ и вероятность появления в ней отказа $Q_{\text{с}1}(t)$ запишутся следующим образом:

$$P_{\text{с}j}(t) = \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t); \quad Q_{\text{с}j}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t), \tag{5.1}$$

где j = 1. При $j = \overline{2, m}$ получаем аналогичные показатели для любой из m – 1 резервных систем. Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием $[P_n(t)]_m$ запишется в виде

$$[P_n(t)]_m = 1 - \prod_{j=1}^{m} [1 - P_{\text{с}j}(t)], \tag{5.2}$$

а вероятность появления в ней отказов

$$[Q_n(t)]_m = \prod_{j=1}^{m} [1 - P_{\text{с}j}(t)], \tag{5.3}$$

где значения величин $P_{\text{с}j}(t)$ определяются из (5.1).Если элементы основной и резервной систем РЭС характеризуются равновероятными отказами, т.е. $p_{11}(t) = p_{12}(t) = \ldots = p_{n1}(t) = p(t)$, то из (5.2) и (5.3) имеем

$$\left.\begin{aligned} [P_n(t)]_m &= 1 - [1 - p^n(t)]^m \\ [Q_n(t)]_m &= [1 - p^n(t)]^m. \end{aligned}\right\} \tag{5.4}$$

Оценим выигрыш в надежности G_Q для рассматриваемого способа резервирования, который показывает, во сколько раз снижается вероятность отказа в резервированной РЭС по сравнению с нерезервированной. Из (5.1) и (4.15) следует, что

$$G_Q = \frac{Q_n(t)}{[Q_n(t)]_m} = \frac{1 - p^n(t)}{[1 - p^n(t)]^m}. \qquad (5.5)$$

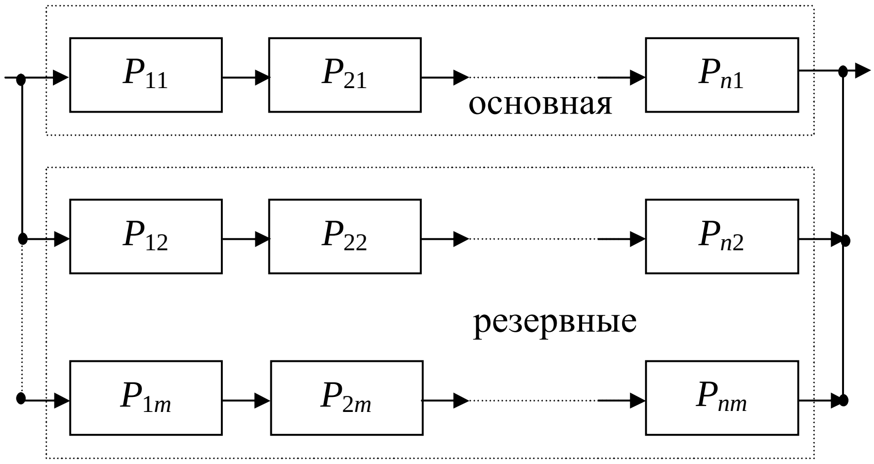


Рис. 5.1

Полагая $p(t)$ близкой к единице, что возможно при $\lambda t << 1$, и пользуясь соотношением $p^n(t) = \exp(-n\lambda t) \approx 1 - n\lambda t$, получаем $1 - p^n(t) \approx n\lambda t$, тогда из (5.5) имеем

$$G_Q \approx \frac{n\lambda t}{(n\lambda t)^m} = \frac{1}{(n\lambda t)^{m-1}}. \qquad (5.6)$$

Пользуясь (5.4), можно решить и обратную задачу: если известна надежность нерезервированной РЭС $P_n(t) = p^n(t)$, то для получения требуемой надежности $[P_n(t)]_m$ можно оценить число систем m, необходимых для включения:

$$m \geq \frac{\ln\{1 - [P_n(t)]_m\}}{\ln[1 - P_n(t)]}. \qquad (5.7)$$

5.2. ПОЭЛЕМЕНТНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Оценим надежность РЭС по модели резервирования, представленной на рис. 5.2. РЭС состоит из основной системы, m-1 резервных систем, каждая из которых содержит n элементов. Вероятность безотказной работы основной системы и появления в ней отказов выражаются формулами (5.1). Вероятность безотказной работы i-й резервирующей системы $P_{ci}(t)$ для любой i-й группы ($i = \overline{1, n}$), согласно (4.15), будет

$$P_{ci}(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m}[1 - p_{ij}(t)], \qquad (5.8)$$

а вероятность возникновения отказа в ней

$$Q_{ci}(t) = \prod_{j=1}^{m} [1 - p_{ij}(t)]. \tag{5.9}$$

Тогда вероятность безотказной работы РЭС с поэлементным, или, как его часто называют, раздельным резервированием $[P_m(t)]_n$, и вероятность появления отказа в ней $[Q_m(t)]_n$, будут

$$\left.\begin{aligned} [P_m(t)]_n &= \prod_{i=1}^{n} \{1 - \prod_{j=1}^{m} [1 - p_{ij}(t)]\} \\ [Q_m(t)]_n &= 1 - \prod_{i=1}^{n} \{1 - \prod_{j=1}^{m} q_{ij}(t)\} \end{aligned}\right\} \tag{5.10}$$

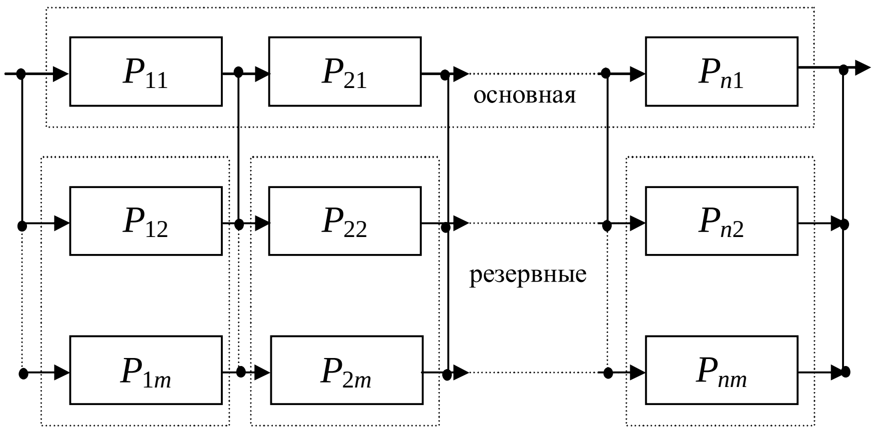


Рис. 5.2

Если элементы, входящие в резервированную РЭС, равнонадежны, т.е. $p_{ij}(t) = p(t)$, то

$$[P_m(t)]_n = \{1 - [1 - p(t)]^m\}^n. \tag{5.11}$$

Пользуясь (5.11), оценим выигрыш в надежности по G_Q рассматриваемого варианта резервирования. Полагая $q(t) << 1$, получаем

$$[1 - q^m(t)]^n \approx 1 - nq^m(t) \approx 1 - n(\lambda t)^m,$$

откуда

$$G_Q = \frac{Q_n(t)}{[Q_n(t)]_m} = \frac{n\lambda t}{1 - [1 - n(\lambda t)^m]} \approx \frac{1}{(\lambda t)^{m-1}}. \tag{5.12}$$

Сравнивая (5.12) с (5.4), замечаем, что поэлементное резервирование дает при малых интенсивностях отказов элементов λ выигрыш в n^{m-1} раз больший, чем общее резервирование. Поэтому такое резервирование наиболее эффективно при сравнительно простых узлах.

На основе соотношения (5.9) можно оценить, сколько потребуется резервных систем m для достижения требуемой надежности $[P_m(t)]_n$, если известна надежность нерезервированной системы $P_n(t) = p^n(t)$:

$$m \geq \frac{\ln(1-\sqrt[n]{[P_m(t)]_n})}{\ln(1-\sqrt[n]{P_n(t)})}. \tag{5.13}$$

5.3. СМЕШАННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Обобщенная модель резервирования для этого случая представлена на рис. 5.3. В ней выделены для удобства три группы (I, II, III) с одинаковыми методами резервирования. Согласно рис. 5.3, вероятность безотказной работы РЭС $P_c(t)$ со смешанным резервированием имеет вид

$$P_c(t) = P_{\mathrm{I}}(t)P_{\mathrm{II}}(t)P_{\mathrm{III}}(t), \tag{5.14}$$

где надежности выделенных групп будут соответственно:

$$P_{\mathrm{I}}(t) = 1-\prod_{j=1}^{m}[1-P_{cj}(t)]; \tag{5.15}$$

$$P_{\mathrm{II}}(t) = \prod_{i=n+1}^{k}\left\{1-\prod_{j=1}^{r}[-p_{ij}(t)]\right\}; \tag{5.16}$$

$$P_{\mathrm{III}}(t) = \prod_{i=k+1}^{e}p_i(t). \tag{5.17}$$

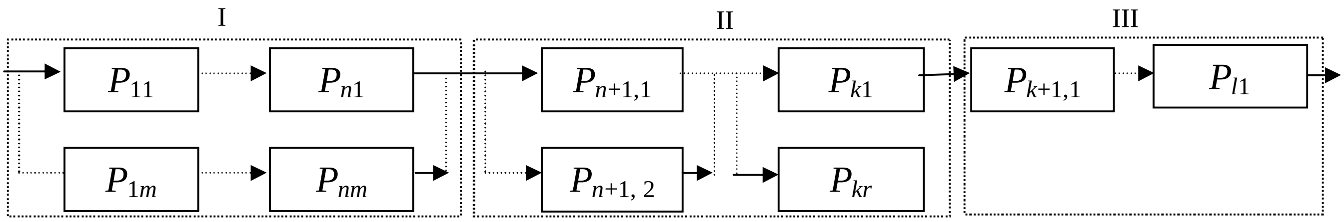


Рис. 5.3

Таким образом, независимо от сложности реальной РЭС, структурная схема надежности может быть представлена комбинацией последовательных, параллельных и последовательно-параллельных соединений элементов.

5.4. МАЖОРИТАРНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Мажоритарное резервирование, в отличие от рассмотренных разновидностей структурного резервирования и применяемых для его осуществления как аналоговых, так и цифровых систем, используется для резервирования только цифровой РЭС. При мажоритарном резервировании сигнал в двоичном коде (логический 0 или 1) подается на нечетное число идентичных элементов. С выходов этих элементов сигналы поступают на вход так называемого решающего элемента. Его назначение в выделении безошибочного сигнала из групп сигналов, среди которых могут быть и ошибочные. Выходной сигнал формируется по закону, лежащему в основе функционирования решающего элемента. Простейший и наиболее широко распространенный закон – это закон большинства, или мажоритарный закон. Поэтому решающий элемент, реализующий этот закон, называется мажоритарным элементом. В этом случае его выходной сигнал всегда принимает значения, равное значению большинства входных сигналов. Наиболее распространены мажоритарно резервированные элементы, реализующие операцию «два из трех» (рис. 5.4).

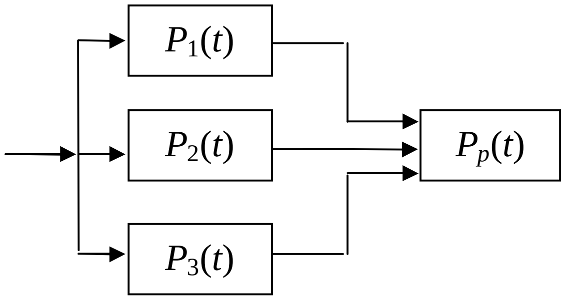


Рис. 5.4

Определим вероятность безотказной работы мажоритарно резервированного элемента, если известны надежности $p_i(t)$ (i = 1..3) идентичных элементов и надежность $p_р(t)$ решающего. Для наглядности воспользуемся табл. 5.1 истинности, отражающей всевозможные состояния элементов в схеме на рис. 5.4 (0 – отказ элемента; 1 – его работоспособность).

Таблица 5.1

Первый элемент	Второй элемент	Третий элемент	Решающий элемент
0	1	1	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	0	0	0
1	1	0	1
1	0	1	1

Считая $p_i(t) = p(t)$, $i = \overline{1{,}3}$ и пользуясь данными табл.6 можно найти вероятность безотказной работы мажоритарно резервированного элемента $P_м(t)$ в предположении, что решающий элемент обладает идеальной надежностью $p_р(t) = 1$. Выбирая в таблице строки только с единицами в последнем столбце, можно записать

$$P_{\text{м}}(t) = q_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t) + \\ + q_1(t)q_2(t)p_3(t). \tag{5.18}$$

Подставляя в (5.18) $q_i(t) = 1 - p(t)$ и $p_i(t) = p(t)$, имеем

$$P_{\text{м}}(t) = p^2(t)[3 - 2p(t)]. \tag{5.19}$$

Заметим, что формулу (5.19) можно получить, воспользовавшись биномиальным законом распределения, но приведенное выше решение нагляднее.

Если решающий элемент неидеален, то

$$P_{\text{м}}(t) = p^2(t)p_{\text{р}}(t)[3 - 2p(t)]. \tag{5.20}$$

Помимо мажоритарного элемента «два из трех», используются и более сложные элементы, например, «три из пяти».

В заключение укажем, что резервирование применяется обычно в сложных технических системах, отказы в которых недопустимы по условиям работы: бортовых системах космических аппаратов; цифровых РЭС высоких уровней и т.д. Применяя резервирование, следует помнить, что оно усложняет структурную схему РЭС, увеличивает ее массу, габариты и стоимость.

5.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Какова цель резервирования, используемого в РЭС?
2. Какие виды резервирования существуют?
3. Как определяется вероятность безотказной работы систем с общим резервированием?
4. Как определяется кратность резервирования?
5. Как оценивается выигрыш в надежности при общем резервировании?
6. Как находится порядок резервирования при общем резервировании?
7. Как определяется вероятность безотказной работы при поэлементном резервировании?
8. Как оценивается выигрыш в надежности при поэлементном резервировании?
9. Как определяется порядок поэлементного резервирования?
10. Что такое смешанное резервирование?
11. Что такое мажоритарное резервирование?
12. Структурная схема надежности прибора приведена на рис. 5.5. Найти вероятность безотказной работы при резервировании первого блока с кратностью, равной четырем, второго – трем. Известно: $P_1 = 0{,}8$; $P_3 = 0{,}99$; $q_2 = 0{,}1$.

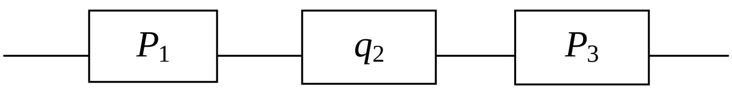


Рис. 5.5

Ответ: 0,987.

13. Для схемы на рис. 5.5 найти вероятность безотказной работы устройства при общем резервировании с кратностью, равной 3.

Ответ: 0,992.

14. Структурная модель надежности блока приведена на рис.5.6.

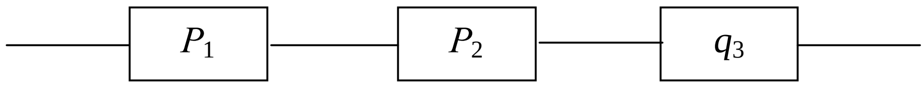


Рис. 5.6

Найти вероятность безотказной работы блока при:
а) раздельном резервировании блоков один и два с кратностью два;
б) при общем резервировании этих блоков с кратностью два, если P_1=0,8; P_2=0,9; q_3=0,01.

Ответ: а) 0,941; б) 0,912.

15. Структурная модель надежности устройства приведена на рис. 5.7. Найти вероятность безотказной работы устройства, если второй блок резервируется с кратностью, равной трем, а третий – с кратностью, равной двум. Известно: $P_1 = 0{,}9$; $P_2 = 0{,}7$; $P_3 = 0{,}8$.

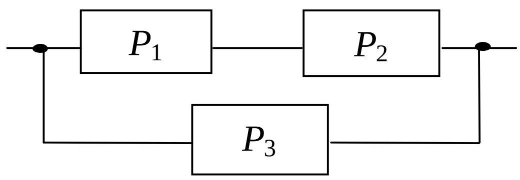


Рис. 5.7

Ответ: 0,991.

16. Радиосистема имеет вероятность безотказной работы P^n. Определить выигрыш в надежности по отказу при введении общего резервирования третьего порядка при $P = 0{,}9$; $m = 3$.

Ответ: 5,95.

17. Радиоизделие имеет вероятность безотказной работы P^n. Определить выигрыш в надежности по вероятности безотказной работы при введении общего резервирования третьего порядка при $P = 0{,}8$; $m = 3$; $n = 5$.

Ответ: 1,726.

18. Блок, структурная модель надежности которого дана на рис.5.8, имеет общее резервирование второго порядка. Найти выигрыш в надежности по среднему времени наработки до первого отказа, если λ_1=0,5·10^{-4} ч$^{-1}$; λ_2=4·10^{-5} ч$^{-1}$; λ_3=10^{-5} ч$^{-1}$.

Ответ: 1,4846.

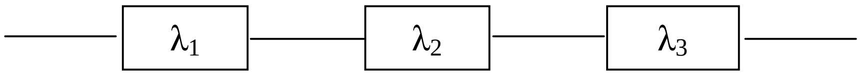


Рис. 5.8

19. Найти выигрыш в надежности по среднему времени наработки до первого отказа для блока, указанного в предыдущей задаче, при раздельном резервировании второго порядка первого блока, если все блоки равнонадежны с интенсивностью λ=2·10^{-4} ч$^{-1}$.

Ответ: 2,1.

20. Найти выигрыш в надежности по интенсивности отказов для блока из задачи 18 при общем резервировании второго порядка за 1 000 ч.

Ответ: 1,754.

21. Найти выигрыш в надежности по интенсивности отказов для блока из задачи 18 при раздельном резервировании второго порядка блока два за 1 000 ч.

Ответ: 12,6.

22. Радиоизделие состоит из пяти блоков с равнонадежными элементами *P*=0,9. Структурная модель надежности приведена на рис.5.9.

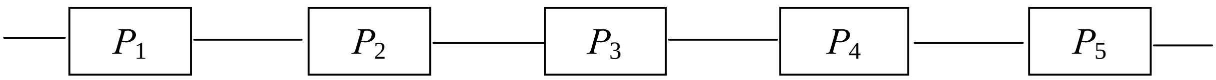


Рис. 5.9

Блоки один и два имеют общее резервирование с кратностью два. Блоки три и четыре имеют поэлементное резервирование с кратностью три. Найти выигрыш в надежности по вероятности отказа.

Ответ: 46,6.

23. Радиоприбор содержит два блока с вероятностями безотказной работы $P_i = 0{,}7 \quad \left(i = \overline{1{,}2}\right)$. Определить порядок раздельного резервирования, необходимый для достижения уровня надежности, равного $P_{\text{рез}} = 0{,}99$.

    Ответ: 3.

24. Радиосистема содержит три блока с вероятностями безотказной работы $P_i = 0{,}8$. Определить кратность раздельного резервирования, необходимую для достижения $P_{\text{рез}} = 0{,}99$.

    Ответ: 3.

25. Прибор состоит из двух блоков, имеющих вероятности безотказной работы $P_{1,2} = 0{,}9$. Определить порядок общего резервирования, при котором уровень надежности прибора будет $P_{\text{рез}} = 0{,}99$.

    Ответ: 2.

26. Основной тракт имеет вероятность исправной работы P^n. Определить выигрыш в надежности по отказу при введении раздельного резервирования второго порядка при $P = 0{,}9$, если $n = 2$.

    Ответ: 9,5.

27. Основной тракт радиодальномера содержит два блока с вероятностями отказов $q_1 = q_2 = 0{,}1$. Для повышения надежности основной тракт резервируется аналогичными блоками, причем вероятность безотказной работы системы при раздельном резервировании стала $P_{\text{рез}} = 0{,}98$. Определить порядок системы с резервированием.

    Ответ: 2.

28. Синтезатор частоты содержит три БИС с вероятностями безотказной работы каждой 0,9. Для повышения надежности синтезатора частоты используется резервирование с таким расчетом, чтобы вероятность его безотказной работы возросла до 0,994. Определить общее число БИС в системах: а) с общим резервированием; б) с поэлементным резервированием.

Ответ: 12,9.

29. Доказать, что для системы с раздельным резервированием, состоящей из равнонадежных элементов ($q_i = q$ для $i = \overline{1,n}$), при значении $q << 1$ снижение вероятности отказа при раздельном r-кратном резервировании составляет величину порядка q^{-r} .

30. Доказать, что в системе с поэлементным резервированием и при равнонадежных элементах с $q << 1$, вероятность отказа равна $n^m q^m$, где n – число основных элементов; m – порядок резервирования.

31. Найти вероятность безотказной работы $P_м(t)$ мажоритарного элемента, работающего по принципу «три из пяти», предполагая, что надежности идентичных элементов равны P,а решающий элемент обладает идеальной надежностью.

Ответ: $P^3(10\text{-}15P+6P^2)$.

32. Структурная модель надежности блока приведена на рис. 5.10. Интенсивность отказов элементов одинакова и равна $5{\cdot}10^{-5}$ ч$^{-1}$. Для повышения надежности блок резервируют с кратностью, равной двум, целиком (общее резервирование). Найти выигрыш по вероятности безотказной работы за 1 000 ч.

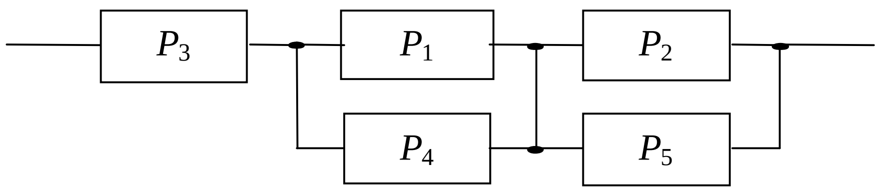


Рис. 5.10

Ответ: 1,0525.

33. Решить предыдущую задачу для выигрыша по отказу.

Ответ: 400.

34. Структурная схема надежности изделия приведена на рис. 5.10. Для блоков один и два применяется поэлементное резервирование с кратностью, равной двум, блок три, четыре без резерва. Вероятность безотказной работы блоков одинакова и равна 0,9. Найти вероятность безотказной работы устройства с резервом.

Ответ: 0,8998.

35. Структурная схема надежности изделия имеет основной вид, надежность всех блоков одинакова и равна 0,8. Какое резервирование (общее или поэлементное) наиболее выгодно.

6. НАДЕЖНОСТЬ РЕМОНТИРУЕМЫХ РЭС

6.1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕМОНТИРУЕМЫХ СИСТЕМ

Ремонтируемые системы восстанавливаются при отказах, после чего продолжают их дальнейшую эксплуатацию. Надежность ремонтируемых систем оценивается большей частью по характеристикам потока отказов, которые рассматривают как случайные события. В теории надежности ремонтируемых систем широко применяются простейшие потоки отказов, характеризующиеся ординарностью, стационарностью и отсутствием последействия.

Кроме того, простейший поток отказов обладает следующими свойствами: вероятность того, что за время τ произойдет m отказов, определяется законом Пуассона; время между отказами подчиняется экспоненциальному закону; среднее число отказов за время τ равно $\lambda\tau$; вероятность того, что за время τ не произойдет ни одного отказа, равна $\exp(-\lambda\tau)$. Простейший поток отказов называют также стационарным пуассоновским потоком, и характерен он для сложных высоконадежных систем.

Показателями надежности ремонтируемых систем служат функции готовности $k_{\text{г}}(t)$ и простоя $k_{\text{п}}(t)$. Эти функции представляют собой соответственно вероятности пребывания системы в работоспособном состоянии и состоянии простоя. С течением времени эксплуатации они стремятся к стационарным значениям: $\lim\limits_{t\to\infty} k_{\text{г}}(t) = K_{\text{г}}$ и $\lim\limits_{t\to\infty} k_{\text{п}}(t) = K_{\text{п}}$. Величины $K_{\text{г}}$ и $K_{\text{п}}$ называют соответственно коэффициентами готовности и простоя системы (они введены ранее в п. 2.2, см. формулы (2.32), (2.33)).

Показателем надежности ремонтируемых систем является коэффициент оперативной готовности

$$K_{\text{ог}} = K_{\text{г}} P_{\text{в}}(t), \qquad (6.1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы по внезапным отказам.

При определении $P_i(t)$ считается, что время работы устройства соответствует периоду нормальной эксплуатации, интенсивности отказов элементов являются постоянными, распределение времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону. Предлагается также, что отказы элементов являются внезапными, полными и независимыми.

Расчетно-логическая система нерезервированного устройства представляет собой цепочку последовательно соединенных элементов, отказ любого из которых приводит к отказу устройства в целом. Интенсивности отказов элементов зависят от их электрической нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов, учитываемых с помощью поправочных коэффициентов.

Интенсивность отказов элементов i-го типа определяется по формуле $\lambda_i = \lambda_{oi}\alpha_i k_1 k_2 k_3$, где λ_{oi}- интенсивность отказов данного типа элементов при номинальной электрической нагрузке и нормальных условиях эксплуатации; α_i – коэффициент влияния температуры окружающей среды и электрической нагрузки элемента; k_1 – коэффициент влияния механических факторов; k_2 – коэффициент влияния климатических факторов; k_3 – коэффициент влияния пониженного атмосферного давления.

Под коэффициентом электрической нагрузки $k_н$ понимается отношение рабочего значения электрического параметра к его номинальному значению, установленному нормативно-технической документацией.

Если внешние воздействия на все элементы устройства одинаковы, при вычислении λ произведение k_1 k_2 k_3 может быть записано перед знаком суммы. Интенсивность отказов устройства в целом $\lambda = k_1 k_2 k_3 \sum_{i=1}^{n} \lambda_i m_i$, где m_i – число элементов i-го типа; n – число типов элементов.

Вероятность безотказной работы устройства рассчитывается по формуле $P_i(t) = e^{-\lambda t}$.

Показателем надежности ремонтируемых систем является вероятность того, что система будет находится в одном из возможных работоспособных состояний: $P(t) = \sum_{i=1}^{k} P_i(t)$, где $P_i(t)$ - вероятность нахождения системы в одном из i-х работоспособных состояний.

6.2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РЕМОНТИРУЕМОЙ РЭС

Рассмотрим РЭС, которая допускает перерывы в работе, т.е. восстанавливаемая в процессе эксплуатации аппаратура.

6.2.1 *Оценка надежности нерезервируемой ремонтируемой РЭС*

Имеется нерезервированная ремонтируемая РЭС, показатели надежности которой необходимо определить. Такая система в любой момент времени t может находиться только в одном из двух возможных состояний: работоспособном и неработоспособном. Первое обозначим условно индексом 0, неработоспособное состояние – 1. Интенсивность перехода из состояния 0 в 1 примем λ, а из состояния 1 в 0 – μ. Графически это представлено на рис. 6.1.

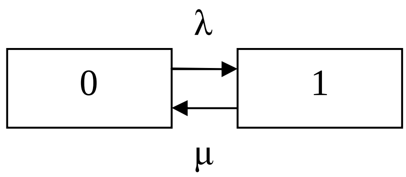


Рис. 6.1

Каждому состоянию РЭС ставят дифференциальное уравнение по правилу: в левой его части помещают производную по времени вероятности данного состояния $dP_j(t)/dt$, j=0,1 , в правой – члены уравнения, образующиеся умножением интенсивностей переходов и знаками: плюс, если стрелка направлена к состоянию, и минус – если от него. Полученную таким образом систему дифференциальных уравнений дополняют нормированным условием: сумма вероятностей всех возможных состояний равна единице. Совместное решение этих уравнений дает возможность определить функции готовности и простоя системы.

Обозначим вероятности состояния 0 и 1 соответственно $P_0(t)$ и $P_1(t)$. При этом очевидно, что $P_0(t)=k_г(t)$; $P_1(t)=k_п(t)$.

В соответствии со схемой рис. 6.1 составим уравнения системы:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t); \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \tag{6.2}$$

Решим эту систему уравнений для двух случаев с разными начальными условиями:

а) в начальный момент времени система работоспособна, т.е. при t = 0 $P_0(t)=1$; $P_1(t)=0$.

С учетом этих условий решение системы (6.2) имеет вид

$$\begin{cases} k_г(t) = P_0(t) = \dfrac{\mu}{\lambda+\mu} + \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp\left[-(\lambda+\mu)t\right]; \\ k_п(t) = P_1(t) = \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu} - \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp\left[-(\lambda+\mu)t\right]. \end{cases} \tag{6.3}$$

б) в начальный момент времени система неработоспособна, т.е. при t=0 $P_0(t)=0$; $P_1(t)=1$.

С учетом этого решение системы уравнений (6.2) приводит к следующим результатам

$$\begin{cases} k_г(t) = P_0(t) = \dfrac{\mu}{\lambda+\mu} - \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp\left[-(\lambda+\mu)t\right]; \\ k_п(t) = P_1(t) = \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu} + \dfrac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp\left[-(\lambda+\mu)t\right]. \end{cases} \tag{6.4}$$

В установившемся режиме эксплуатации системы, т.е. при $t \to \infty$, выражения (6.3) и (6.4) приобретают вид стационарных коэффициентов готовности и простоя $K_г$ и $K_п$, не зависящих от начальных условий: $K_г = \mu/(\lambda + \mu)$; $K_п = \lambda/(\lambda + \mu)$.

Обозначим $T_о$ и $T_в$ среднее время безотказной работы и среднее время восстановления системы соответственно. Очевидно, что $\lambda = 1/T_о$; $\mu = 1/T_в$. Подставим эти значения λ и μ в (6.4), получим

$$K_г = \frac{T_о}{T_о + T_в}; \quad K_п = \frac{T_в}{T_о + T_в}, \tag{6.5}$$

что совпадает с (2.32). Значение $T_о = 1/\lambda$, а среднее время восстановления устройства вычисляется по формуле $T_в = \frac{1}{\lambda}\sum_{i=1}^{n}(\tau_о + \tau_{вi})\lambda_i m_i$, где $\tau_о$ – время ожидания ремонта, выбираемое из условий эксплуатации устройства; $\tau_{вi}$ – среднее время восстановления для i-го типа элементов.

Рассчитанное $T_в$ необходимо округлить до ближайшего большего значения ряда: 1; 5; 10; 20; 40; 60 мин; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 18; 24; 36; 48; 96 ч.

6.2.2. *Оценка надежности нерезервируемой РЭС, ремонтируемой двумя способами*

Рассмотрим надежность нерезервированной РЭС, когда в системе возможен ремонт двумя способами: полный ремонт, характеризующийся интенсивностями отказа λ_1и полного ремонта μ_1; частичный ремонт, характеризующийся интенсивностями отказа λ_2 и восстановления μ_2. Для таких систем свойственны следующие состояния и вероятности этих состояний: 0 – система исправна после полного ремонта, вероятность этого состояния $P_0(t)$; 1 – неисправна и производится частичный ремонт, вероятность состояния $P_1(t)$; 2 – исправна после частичного ремонта, вероятность состояния $P_2(t)$; 3 – система неисправна и производится полный ремонт, вероятность состояния $P_3(t)$. Структурная схема состояний приведена на рис. 6.2.

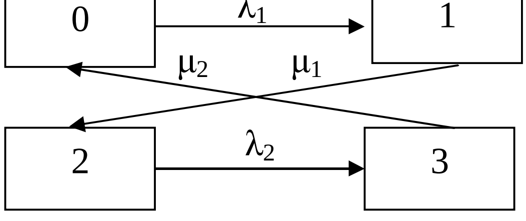


Рис. 6.2

Составим систему дифференциальных уравнений в соответствии с рис. 6.2 и правилом, приведенным в п. 6.1:

$$
\begin{cases}
\dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 P_0(t) + \mu_2 P_3(t); \\
\dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t); \\
\dfrac{dP_2(t)}{dt} = \mu_1 P_1(t) - \lambda_2 P_2(t); \\
\dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_2 P_2(t) - \mu_2 P_3(t); \\
P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1.
\end{cases}
\tag{6.6}
$$

Вероятность исправной работы или функция готовности $k_г(t) = P_0(t) + P_2(t)$.

Вероятность отказа или функция простоя $k_п(t) = P_1(t) + P_2(t)$.

Переходя от системы дифференциальных уравнений (6.6) к системе алгебраических уравнений в стационарном режиме, получим

$$
\begin{cases}
-\lambda_1 P + \mu_2 P_3 = 0; \\
\lambda_1 P_0 - \mu_1 P_1 = 0; \\
\mu_1 P_1 - \lambda_2 P_2 = 0; \\
\lambda_2 P_2 - \mu_2 P_3 = 0; \\
P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1;
\end{cases}
\tag{6.7}
$$

$$
\begin{aligned}
K_г &= \frac{\lambda_1\mu_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1\mu_2}{\lambda_1\lambda_2\mu_1 + \lambda_2\mu_1\mu_2 + \lambda_1\lambda_2\mu_2 + \lambda_1\mu_1\mu_2} = \\
&= \frac{\mu_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\mu_1 + \mu_2) + \mu_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2)}
\end{aligned}
\tag{6.8}
$$

6.2.3. *Оценка надежности системы из двух блоков и ремонтируемой двумя бригадами*

Рассмотрим систему из двух блоков и два случая ремонта изделия: ремонт одной бригадой и двумя, если требуется срочное восстановление системы.

При ремонте одной бригадой будем считать, что система выходит из строя, если вышел из строя хотя бы один из блоков. Интенсивность отказа и ремонта примем равными λ и μ соответственно. Такая система характеризуется тремя состояниями: состояние 0 с вероятностью $P_0(t)$ – система исправна; состояние 1 с вероятностью безотказной работы $P_1(t)$ – исправен один блок, а другой отказал и находится в ремонте; состояние 2 с вероятностью $P_2(t)$, когда неисправны оба блока. Поскольку в состоянии 0 система состоит из двух блоков, то интенсивность отказа у нее в два раза выше. Структурная схема состояний будет иметь вид, представленный на рис. 6.3. Интенсивность ремонта одинакова для обоих блоков, поэтому ремонт блоков будет идти с одинаковой интенсивностью μ.

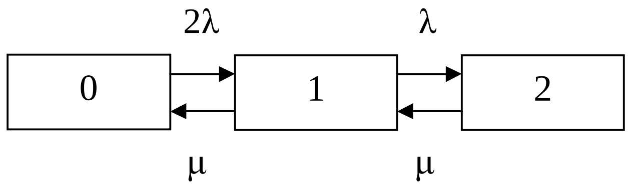


Рис. 6.3

Система дифференциальных уравнений, соответствующая схеме состояний,

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (\mu + \lambda) P_1(t) + \mu P_2(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t); \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \tag{6.9}$$

Вероятность безотказной работы, или функция готовности будет, определяться только $P_0(t)$. Отсюда для стационарного состояния коэффициент готовности вычисляется по формуле

$$K_{\text{г}} = P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \, . \tag{6.10}$$

Рассмотрим случай, когда при выходе из строя второго блока подключается вторая бригада. Схема состояний приведена на рис. 6.4.

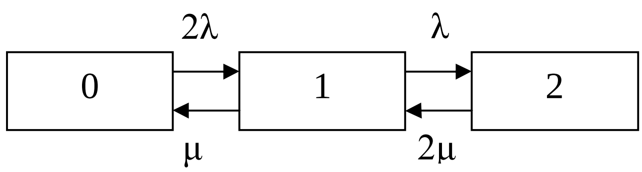


Рис. 6.4

Соответствующая система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (\mu + \lambda) P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t); \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \tag{6.11}$$

После перехода к стационарной системе уравнений определяем коэффициент готовности $K_г$ системы:

$$K_г = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2} \qquad (6.12)$$

Рассмотрим случай, когда при выходе из строя одного блока к ремонту подключается одна бригада и часть второй. Если выходят из строя оба блока, то в ремонте участвуют обе бригады. Это означает, что по сравнению со вторым случаем схема состояний будет иметь вид, приведенный на рис. 6.5.

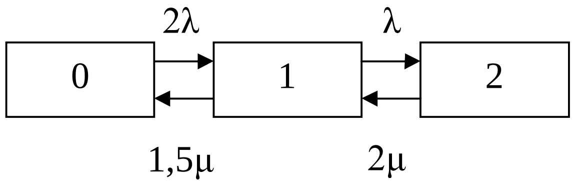


Рис. 6.5

Анализируя схему состояний, получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + 1{,}5\mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (1{,}5\mu + \lambda) P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t); \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \qquad (6.12)$$

Переходя к системе алгебраических уравнений, определим коэффициент готовности системы

$$K_г = P_0(t) = \frac{3\mu^2}{3\mu^2 + 4\lambda\mu + 2\lambda^2} \ . \qquad (6.13)$$

Таблица 6.1

Способ ремонта	Коэффициент готовности, $ч^{-1}$	Суммарный простой за 10 000 ч , ч
Одна ремонтная бригада	0,9050	950
Две ремонтных бригады:		
а) раздельное обслуживание	0,9070	930
б) совместное обслуживание	0,9360	640

Если рассчитать коэффициент готовности по формулам (6.8), (6.10) и (6.13), полагая, что интенсивность отказов λ =0,05 ч$^{-1}$, а интенсивность ремонта μ =1,0 ч$^{-1}$, то получим коэффициент готовности и суммарное время простоя за 10 000 ч. Для РЭС из двух блоков эти показатели будут иметь значения, указанные в табл. 6.1 .

6.2.4. *Оценка надежности системы с ненагруженным резервом*

Рассмотрим систему с ненагруженным резервом. Пусть РЭС состоит из одной основной и (m-1) резервной подсистем, причем все они обладают одинаковой надежностью. Такая система может пребывать в любом из m состояний: когда ее основная и резервная цепи работоспособны, когда j цепей неработоспособны (j=1,2… $\le m$-1) и когда все m цепей неработоспособны. Обозначим эти состояния индексами 0, j , m и составим схему состояний (рис. 6.6).

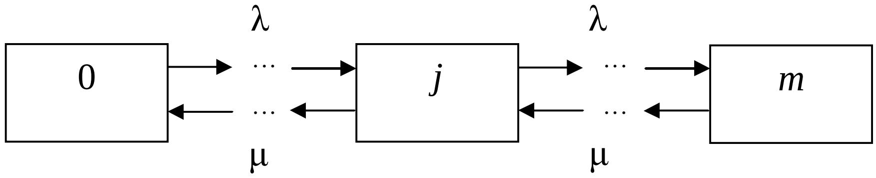


Рис. 6.6

Поскольку все m цепей системы идентичны и для условий нормальной эксплуатации ЭВА необходимо и достаточно, чтобы одна ее подсистема была работоспособной ((m-1) резервных цепей при этом отключены), то очевидно, что интенсивности переходов системы λ из работоспособного состояния в неработоспособное будут одинаковыми, равно как и интенсивности переходов μ из неработоспособного состояния в работоспособное. Будем считать, что переключатель резерва обладает идеальной надежностью и выход из строя одной из подсистем не вызывает перерыва в работе РЭС, а подсистемы, пребывающие в состоянии ненагруженного резерва, имеют интенсивность отказа нуль.

В соответствии со схемой на рис 6.6 и руководствуясь ранее сформулированными правилами, запишем систему дифференциальных уравнений, характеризующих поведение исследуемой системы. Она будет иметь вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \dfrac{dP_j(t)}{dt} = \lambda P_{j-1}(t) - (\mu + \lambda) P_j(t) + \mu P_{j+1}(t); \\ \dfrac{dP_m(t)}{dt} = \lambda P_{m-1}(t) - \mu P_m(t); \\ \sum\limits_{j=0}^{m} P_j = 1, \end{cases} \tag{6.14}$$

где $P_j(t)$-вероятность пребывания системы в состояниях j=0, 1,…, (j-1), j, (j+1), …, (m-1), m. При $t \to \infty$ система (6.14) вырождается в алгебраическую:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\ \lambda P_{j-1} - (\mu + \lambda) P_j + \mu P_{j+1} = 0; \\ \lambda P_{m-1} - \mu P_m = 0; \\ \sum\limits_{j=0}^{m} P_j = 1. \end{cases} \qquad (6.15)$$

Совместное решение системы с учетом, что вероятность P_m равна коэффициенту простоя, приводит к результату

$$K_{\text{п}} = \frac{1}{\sum\limits_{j=0}^{m} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^j} \qquad (6.16)$$

и соответственно коэффициент готовности будет $K_{\text{г}} = 1 - K_{\text{п}} = 1 - P_m$.

6.2.5. *Оценка надежности системы с нагруженным резервом*

Система с нагруженным резервом отличается от рассмотренной ранее тем, что все ее (m-1) резервных подсистем находятся в состоянии нагруженного резерва. Схема состояний такой системы при ограниченном восстановлении показана на рис. 6.7.

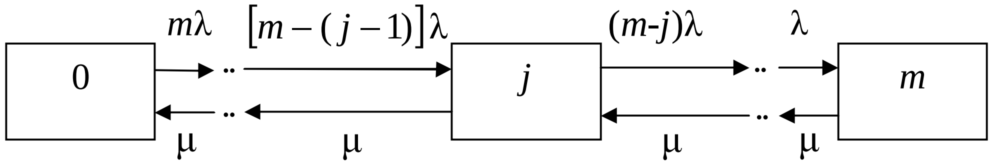


Рис. 6.7

Поскольку в данном случае одновременно все m цепей системы находятся в работе, то мы не можем считать интенсивности их отказов равными нулю. Поэтому интенсивности переходов РЭС из состояния 0 в последующие неодинаковы, что показано на рис. 6.7 соответствующими обозначениями над стрелками. Переход же системы из любого неработоспособного состояния в работоспособное будет одинаковым в силу идентичности цепей системы.

Составим уравнения этой системы по аналогии с уравнениями (6.1) и (6.14). Получим систему дифференциальных уравнений

$$
\begin{cases}
\dfrac{dP_0(t)}{dt} = -m\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\
\dfrac{dP_j(t)}{dt} = \left[m - (j-1)\right]\lambda P_{j-1}(t) - \left[(m-j)\lambda + \mu\right] P_j(t) + \mu P_{j+1}(t); \\
\dfrac{dP_m(t)}{dt} = \lambda P_{m-1}(t) - \mu P_m(t); \\
\sum\limits_{j=0}^{m} P_j = 1.
\end{cases}
\tag{6.17}
$$

При $t \to \infty$ система дифференциальных уравнений переходит в систему алгебраических уравнений

$$
\begin{cases}
- m\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\
-\left[m - (j - 1)\right] P_{j-1} - \left[(m-1)\lambda + \mu\right] P_j + \mu P_{j+1} = 0; \\
\lambda P_{m-1} - \mu P_m = 0; \\
\sum\limits_{j=0}^{m} P_j = 1.
\end{cases}
\tag{6.18}
$$

Решая систему, получаем коэффициент простоя $K_{\text{п}} = P_m$ в виде

$$
K_{\text{п}} = P_m = \frac{1}{\sum\limits_{j=0}^{m} \dfrac{1}{j!} \left(\dfrac{\mu}{\lambda}\right)^j}. \tag{6.19}
$$

6.3. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С КОНТРОЛЕМ

6.3.1 *Оценка надежности системы с устройством контроля*

Полагаем, что устройство контроля обладает интенсивностью отказа λ_2. При отказе этого устройства она выдает сигнал «ложная тревога». Тогда система перестает выполнять свои функции и проводится дополнительная проверка системы с интенсивностью μ_2. Для такой системы характерны следующие состояния: 0 – система исправна; 1 – отключена по сигналу «ложная тревога» и идет дополнительная проверка правильно работающей системы; 2 – система отказала и находится в ремонте. Схема состояний системы изображена на рис. 6.8.

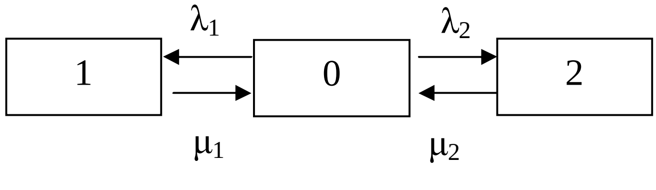


Рис. 6.8

Система дифференциальных уравнений, соответствующих этой схеме, имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - \mu_2 P_2(t); \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \tag{6.20}$$

Перейдя к стационарному режиму определим коэффициент готовности системы

$$K_г = P_0 = \frac{\mu_1\mu_2}{\mu_1\mu_2 + \lambda_1\mu_2 + \mu_1\lambda_2}. \tag{6.21}$$

6.3.2 *Оценка надежности дублированной системы с устройствами контроля*

Пусть каждый образец имеет свое устройство контроля (рис. 6.9), при этом каждая из систем (A или B) характеризуется такими же параметрами (λ_1, λ_2, μ_1, μ_2) , что и система в п. 6.3.1.

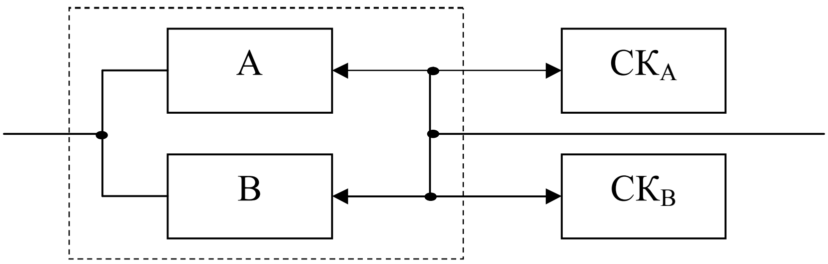


Рис. 6.9

Обозначим состояния системы: 0 – оба устройства (A и B) функционируют; 1 – устройство A (B) на проверке по сигналу «ложная тревога», а система B (A) – работает; 2 – устройство A (B) в ремонте, а устройство B (A) находится в это время в работе; 3 – устройство A (B) на проверке по сигналу «ложная тревога», а устройство B (A) в это время ремонтируется; 4 – оба устройства в ремонте. Очевидно, что система работоспособна в трех состояниях, поэтому коэффициент готовности $K_г = P_0 + P_1 + P_2$.

Схема состояний приведена на рис. 6.10.

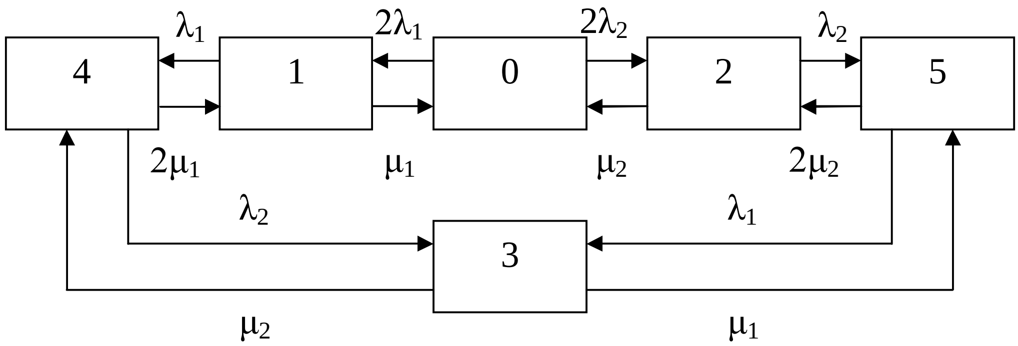


Рис. 6.10

В схеме на рис. 6.10 учтено, что интенсивность отказов дублированной системы будет не λ_2, а $2\lambda_2$; соответственно интенсивность отказов по сигналу «ложная тревога» будет не λ_1, а $2\lambda_1$, однако интенсивность ремонта μ_1 и проверок μ_2 не меняется (состояния 0, 1, 2). Из состояния 1 переход в состояние 4 имеет интенсивность отказов λ_1, в связи с одновременной проверкой двух блоков интенсивность проверок удваивается. Аналогично переход из состояния 2 в состояние 5 имеет интенсивность отказов λ_2, а интенсивность ремонта $2\mu_2$. Система дифференциальных уравнений для определения вероятности состояния, соответствующая схеме рис. 6.10, имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0(t)}{dt} = -(2\lambda_1 + 2\lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \dfrac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2)P_1(t) + \mu_2 P_3(t) + 2\mu_1 P_4(t); \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = 2\lambda_2 P_2(t) - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_2(t) + \mu_1 P_3(t) + 2\mu_2 P_5(t); \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)P_3(t); \\ \dfrac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) - 2\mu_1 P_4(t); \\ \dfrac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_2 P_2(t) - \mu_2 P_5(t); \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1. \end{cases} \quad (6.22)$$

6.4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Какая РЭС называется ремонтируемой?.
2. Какими параметрами надежности характеризуется ремонтируемая РЭС?
3. Что характеризует функция готовности?
4. Что характеризует функция простоя?

5. Что такое коэффициент оперативной готовности?
6. Что такое коэффициент простоя?
7. Записать формулу связи между коэффициентом простоя и временем восстановления, а также временем простоя.
8. Записать формулу связи между коэффициентом готовности и временем восстановления, а также временем простоя.
9. Имеется ремонтируемая, нерезервированная РЭС. Определить функцию готовности за 100 ч работы, если среднее время восстановления равно $T_{в}$=10 ч, а среднее время исправной работы $T_{о}$=5 000 ч, в начальном состоянии система исправна.

   Ответ: 0,99899.

10. Имеется ремонтируемая, нерезервированная РЭС. Определить функцию простоя за 100 ч работы, если среднее время восстановления $T_{в}$=20 ч, а среднее время исправной работы $T_{о}$=5 000 ч, в начальном состоянии система исправна.

    Ответ: 0,007958.

11. Имеется ремонтируемая, нерезервированная РЭС, имеющая среднее время восстановления $T_{в}$=15 ч, среднее время исправной работы $T_{о}$=7 000 ч. Определить функцию готовности за 100 ч работы, если в начальном состоянии система исправна.

    Ответ: 0,9979.

12. Имеется ремонтируемая, нерезервированная РЭС, имеющая среднее время восстановления $T_{в}$=15 ч, среднее время исправной работы $T_{о}$=7 000 ч. Определить функцию простоя за 100 ч работы, если в начальном состоянии система исправна.

    Ответ: 0,021.

13. Имеется ремонтируемая, нерезервированная РЭС. Определить коэффициент готовности и коэффициент простоя системы, если среднее время восстановления $T_{в}$=10 ч, а среднее время исправной работы $T_{о}$=5 000 ч.

    Ответ: 0,998; 0,002.

14. Есть дублированная система с ненагруженным резервом. Длительность работы и восстановления каждого устройства одной бригадой подчиняются экспоненциальному закону с параметром λ и μ соответственно. Построить схему состояний устройства и найти коэффициент готовности, если μ=3,5 λ.

Ответ: 0,94.

15. Бортовая ЭВА состоит из трех блоков (рис. 6.11). Блок три находится в состоянии ненагруженного резерва. Известно, что интенсивность отказов второго блока много меньше интенсивности отказов первого и третьего. Нарисовать схему состояний и определить коэффициент готовности ЭВА, если среднее время работы в 10 раз больше времени восстановления.

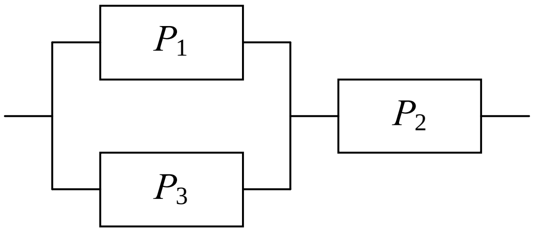


Рис. 6.11

Ответ: 0,9842.

16. Условие задачи такое же, как в предыдущей задаче. Найти коэффициент простоя ЭВА.

Ответ: 0,01577.

17. Как изменится коэффициент готовности схемы в задаче 15, если время простоя уменьшится вдвое?

Ответ: 0,959.

18. По условию задачи 15 найти вероятность полного отказа ЭА, если интенсивность отказа μ в 4 раза больше интенсивности восстановления λ.

Ответ: 0,005.

19. Ремонтируемое радиоизделие имеет среднее время безотказной работы $T_{о}$=1 000 ч, время восстановления $T_{в}$=56 ч. Построить схему состояний устройства. Найти вероятность безотказной работы за 120 ч. В начальный момент изделие исправно, времена $T_{о}$ и $T_{в}$ распределены по экспоненциальному закону.

Ответ: 0,949.

20. Ремонтируемое радиоизделие имеет время восстановления в 10 раз меньше времени безотказной работы. Найти вероятность отказа за 200 ч, если в начальный момент изделие ремонтируется, а $T_{о}$ и $T_{в}$ распределены по экспоненциальному закону. Построить схему состояний.

Ответ: 0,0909.

21. Имеется двухканальная дублированная линия связи. Каналы восстанавливаются одной бригадой. Нарисовать схему состояний. Определить: а) вероятность исправного состояния обоих каналов; б) вероятность состояния, когда оба канала в ремонте; в) коэффициент готовности каналов; г) коэффициент простоя. Считать, что время восстановления и время исправной работы подчинено экспоненциальному закону. Отношение интенсивности отказов к интенсивности восстановления равно единице.

   Ответ: 0,6; 0,4.

22. Имеется ремонтируемая РЭС, состоящая из двух блоков. В случае отказа одного блока ремонт ведется одной бригадой. При отказе обоих блоков подключается вторая бригада. Время восстановления и время исправной работы подчинено экспоненциальному закону распределения. Нарисовать схему состояний устройства и определить коэффициент готовности, считая, что время восстановления в 10 раз меньше времени исправной работы.

   Ответ: 0,8264.

23. По условию задачи 22 определить коэффициент простоя устройства.

   Ответ: 0,1756.

24. По условию задачи 22 определить коэффициент готовности, если отношение интенсивности отказов к интенсивности восстановления равно единице.

   Ответ: 0,25.

25. Имеется радиопередатчик, состоящий из двух каналов. В случае отказа одного из них ремонт не производится. Ремонт начинается после отказа всей системы. Время исправной работы и время ремонта подчинены экспоненциальному закону. Нарисовать схему состояний. Определить коэффициент готовности схемы, если интенсивность отказа в 4 раза больше интенсивности восстановления.

   Ответ: 0,61538.

26. По условию задачи 25 найти вероятность исправного состояния системы.

   Ответ: 0,61538.

27. По условию задачи 25 найти вероятность неисправного состояния системы.

Ответ: 0,076923.

28. По условию задачи 25 найти коэффициент простоя системы.

    Ответ: 0,38462.

29. В передающем блоке системы передачи данных имеется два блока. Если не работает один канал, то ремонтом занимается одна бригада. При отказе обоих блоков ремонт производят две бригады. Время восстановления и время исправной работы подчинено экспоненциальному закону распределения. Построить схему состояний и определить: а) вероятность исправной работы передающей системы; б) коэффициент простоя системы. Считать, что среднее время исправной работы в 10 раз больше времени ремонта.

    Ответ: 0,905; 0,095.

30. При отказе двухканальной дублированной системы ремонт производится двумя бригадами. Найти коэффициент готовности и простоя. Считать, что при отказе одного канала используется персонал одной бригады и часть персонала второй, при отказе обоих каналов ремонт ведут обе бригады. Построить схему состояний. Считать, что среднее время восстановления в 3 раза меньше среднего времени наработки на отказ.

    Ответ: 0,826; 0,174.

31. Ремонтируемый блок РЭС имеет резерв. Количество резервных блоков три. Резерв ненагруженный. Построить схему состояний системы. Определить: а) коэффициент готовности; б) коэффициент простоя. Считать, что отношение μ к λ равно единице.

    Ответ: 0,8; 0,2.

32. Радиопередающая станция имеет передатчик с двумя резервными. Резерв нагруженный. Блоки имеют одинаковую надежность. Восстановление в случае отказа идет поочередно. Время восстановления и время безотказной работы подчинено экспоненциальному закону, причем время восстановления в 2 раза меньше времени исправной работы. Построить схему состояний. Определить: а) коэффициент простоя; б) коэффициент готовности системы.

    Ответ: 0,16; 0,94.

33. Система отображения информации содержит рабочий блок, наработка на отказ которого 200 ч и блок ненагруженного резерва с той же надежностью.

Определить допустимую величину среднего времени ремонта. Известно: ремонт производится одной бригадой; коэффициент простоя не более 10^{-4}.

Ответ: 2 ч.

34. Регистрирующее устройство содержит рабочий блок и блок ненагруженного резерва. Вероятность отказа блока в течение 25 ч не более 0,1. Ремонт производится одной бригадой с интенсивностью восстановления 0,1. Нарисовать схему состояний. Определить: а) коэффициент простоя; б) коэффициент готовности системы.

    Ответ: 0,00169; 0,9983.

35. Радиосистема с блоком контроля имеет интенсивности отказов блока и системы контроля 10^{-4} ч$^{-1}$ и 10^{-5} ч$^{-1}$ соответственно, интенсивности восстановления блока и системы контроля одинаковы и равны 10^{-5} ч$^{-1}$. Нарисовать схему состояний и определить коэффициент готовности системы.

    Ответ: 0,9009.

36. Радиоизделие представляет собой дублированную систему с устройством контроля. Используя систему уравнений 6.10 выразить коэффициент готовности системы через интенсивности отказов λ_1, λ_2 и интенсивности ремонта и контроля μ_1, μ_2. Определить его значения, если интенсивности $\lambda_1 = \lambda_2 = 10^{-5}$ ч$^{-1}$, интенсивности ремонта и проверок одинаковы и равны 10^{-3} ч$^{-1}$.

7. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ТИПОВОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Телекоммуникационная вычислительная сеть (ТВС) – это сеть обмена и распределенной обработки информации, образуемая множеством взаимосвязанных абонентских систем и средствами связи; средства передачи и обработки информации ориентированы в ней на коллективное использование общественных ресурсов – аппаратных, информационных, программных [6].

Любая ТВС представляет собой систему компьютеров, соединенных линиями связи. Надежность ТВС складывается из надежности программных средств и аппаратной части. Поскольку любая программа является индивидуальным продуктом деятельности разработчика, то применение понятий надежности к программным средствам требует учета особенностей и отличия этих объектов от традиционных технических систем [7]. Отказы и сбои, возникающие в программах, вызывают неисправность ТВС и, следовательно, их можно рассматривать как один из элементов, влияющих на интенсивность отказов сети. Рассматривая ТВС как сложную восстанавливаемую систему можно определить ее надежность как коэффициент оперативной готовности за заданное время по формуле (6.1).

По топологии, т.е. конфигурации элементов в ТВС, сети могут подразделяться на два класса: широковещательные и последовательные. Широковещательные конфигурации и значительная часть последовательных («кольцо», «звезда с интеллектуальным центром», «иерархическая») характерны для локальных вычислительных систем [6]. Для глобальных и региональных сетей наиболее распространенной является произвольная (ячеистая) топология, хотя также применяются иерархическая конфигурация и звезда.

В широковещательных конфигурациях в любой момент времени на передачу кадра может работать только одна рабочая станция (абонентская система). Остальные рабочие станции (РС) сети могут принимать этот кадр, т.е. такие конфигурации характерны для ТВС с селекцией информации. Основные типы широковещательной конфигурации – «общая шина», «дерево», «звезда с пассивным центром».

7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТВС СО СТРУКТУРОЙ «ЗВЕЗДА»

Топология ТВС структуры «звезда» (с активным или пассивным центром) представлена на рис.7.1. Она состоит из сервера и m компьютеров. Система работоспособна, если работает хотя бы один компьютер при работающем сервере. При выходе всех компьютеров либо сервера она неработоспособна.

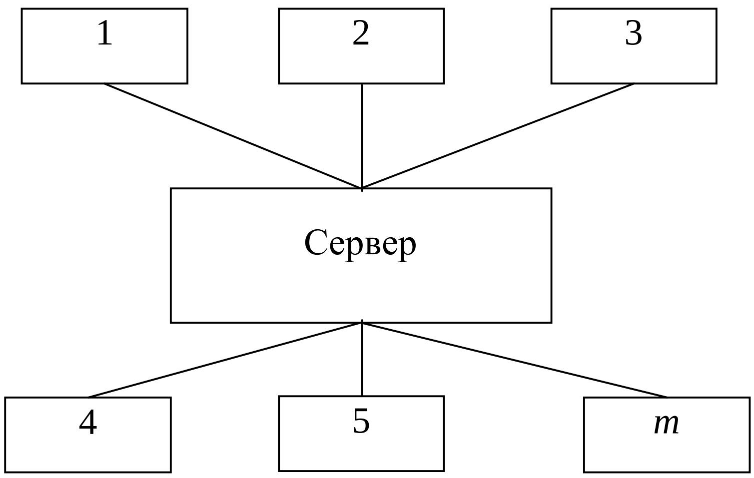


Рис. 7.1

Обозначим возможные состояния системы при работающем сервере:

- 0 – работают все компьютеры и система исправна;
- 1 – отказал один компьютер, но ТВС функционирует;
- 2 – отказало два компьютера, но система работает;

- j – отказало j компьютеров- но система работает; j =0, m –1;
- m – отказали либо все компьютеры, либо сервер, в обоих случаях система не работает.

Схема состояния системы принимает вид, изображенный на рис. 7.2.

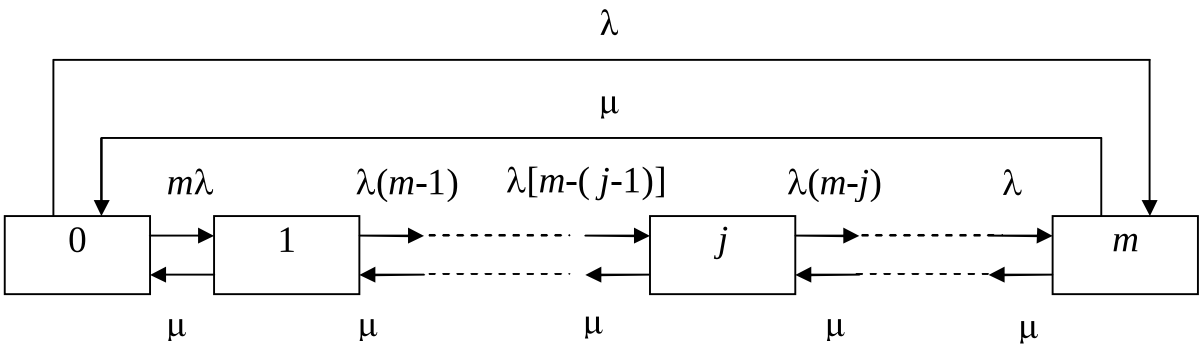


Рис. 7.2

Пусть все компьютеры ТВС, в том числе и сервер, имеют одинаковые интенсивности отказов λ и интенсивности восстановления μ. Обозначим вероятность нахождения системы в j-м состоянии P_j (j = 0,m) и составим систему дифференциальных уравнений относительно указанных состояний, согласно методике в [2]. В результате получим

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dt} = -(m+1)\lambda P_0 + \mu(P_1 + Pm); \\ \dfrac{dP_1}{dt} = m\lambda P_0 - [(m-1)\lambda + \mu]P_1 + \mu P_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dP_j}{dt} = [m-(j-1)]\lambda P_{j-1} - [(m-j)\lambda + \mu]P_j + \mu P_{j+1}, \quad 1 \le j \le m-1; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dP_m}{dt} = \lambda(P_{m-1} + P_0) - 2\mu P_m. \end{cases} \tag{7.1}$$

К системе добавляется условие нормировки

$$\sum_{i=0}^{m} P_i(t) = 1. \tag{7.2}$$

В стационарном состоянии система дифференциальных уравнений (7.1) с учетом (7.2) переходит в систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -(m+1)\lambda P_0 + \mu(P_1 + P_m) = 0; \\ m\lambda P_0 - [(m-1)\lambda + \mu]P_1 + \mu P_2 = 0; \\ \dots\dots\dots \\ [m-(j-1)]\lambda P_{j-1} - [(m-j)\lambda + \mu P_2 = 0; \\ \dots\dots\dots\dots \\ \lambda(P_{m-1} + P_0) - 2mP_m = 0; \\ \sum_{i=0}^{m} P_i = 1. \end{cases} \quad (7.3)$$

Решая систему алгебраических уравнений (7.3), находим коэффициенты простоя $k_п$=P_m и коэффициент готовности $k_г$=1 – $k_п$.

Пример. Рассмотрим ТВС, состоящую из сервера и двух компьютеров. Число состояний системы - три. Тогда система алгебраических уравнений (7.3) примет вид

$$\begin{cases} -3\lambda P_0 + \mu(P_1 + P_2) = 0; \\ -\lambda P_2 + 2\lambda P_0 - \mu P_0 + \mu P_2 = 0; \\ \lambda(P_1 + P_0) - 2\mu P_2 = 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \quad (7.4)$$

Решая систему, находим

$$k_п = P_2 = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}; \quad k_г = \frac{2\mu}{\lambda + 2\mu}. \quad (7.5)$$

Считая, что случайное время работы и случайное время восстановления подчиняются экспоненциальному закону, можно записать λ=1/T_0, μ=1/$T_В$, тогда после подстановки в (7.5) получим коэффициент готовности $k_г$=2T_0 / ($T_в$+ T_0).

Определяем $P_В(t_з)$ по стандартной структурной схеме надежности [4]. В результате получаем $P_в(t) = P_с(t_3)[1 - t_3{}^2 / T_0{}^2]$, где $P_с(t_3)$ – вероятности безотказной работы сервера.

Окончательно надежность ТВС в рассматриваемом примере определяется выражением

$$K_{ог} = K_г \cdot P_в(t_3) = \frac{2T_0}{T_в + 2T_0} P_с(t_3)\left[1 - \frac{t_3{}^2}{T_0{}^2}\right].$$

7.3. НАДЕЖНОСТЬ ТВС СО СТРУКТУРОЙ «КОЛЬЦО»

Топология ТВС со структурой «кольцо» приведена на рис. 7.3. Система работоспособна, если исправны все компьютера. При выходе из строя одного из компьютеров она неработоспособна.

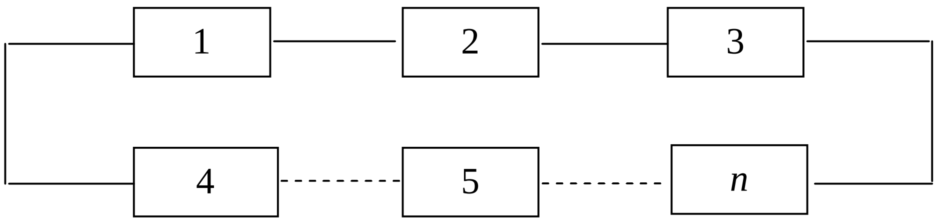


Рис. 7.3

Обозначим возможные состояния системы:

- 0 – система исправна с вероятностью P_0;
- 1 – система неисправна с вероятностью P_1.

Схема состояния имеет вид, приведенный на рис. 7.4.

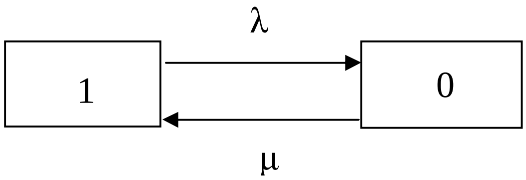


Рис. 7.4

Используя методику [2], получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0 + \mu P;_1 \\ \dfrac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu P_1; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \tag{7.6}$$

В стационарном состоянии из системы дифференциальных уравнений (7.6) получаем систему алгебраических уравнений (7.7)

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\ \lambda P_0 - \mu P_1 = 0; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \tag{7.7}$$

Решая (7.7), получим вероятность исправного состояния P_1, которая является коэффициентом готовности системы:

$$k_г = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \tag{7.8}$$

Считая, что случайное время работы и случайное время восстановления подчиняются экспоненциальному закону, принимаем $\lambda = 1/T_0$; $\mu = 1/T_{\text{в}}$, тогда

$$k_{\text{г}} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\text{в}}}. \tag{7.9}$$

Для вычисления $P_{\text{в}}$ (t_3) необходимо определить структурную модель надежности, исходя из условий работы схем. В случае топологии «кольцо» справедлива последовательная модель надежности. Тогда

$$P_{\text{в}}(t_3) = e^{-n\lambda t_3} \tag{7.10}$$

где n – число компьютеров в системе.

Коэффициент оперативной готовности соответственно определяется по формулам (7.9) и (7.10): $K_{\text{ог}} = \left(T_0 / T_0 + T_{\text{в}}\right)\ e^{-n\lambda t_3}$.

7.4. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ С ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ

Определить надежность информационной системы можно как устройства с профилактическим обслуживанием.

Коэффициент готовности информационной системы с профилактическим обслуживанием определяется из структурной модели состояний, представленной на рис. 7.5.

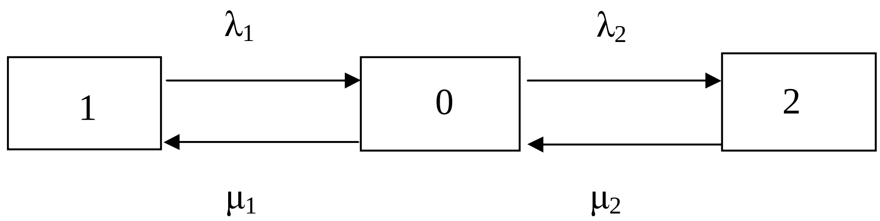


Рис. 7.5

Обозначим состояния системы:

- 0 – система исправна и работает;
- 1 – система на профилактическом обслуживании;
- 2 – система отказала и находится в ремонте.

Интенсивности перехода из состояния 0 в состояние 1 и из состояния 0 в 2 обозначим через λ_1 и λ_2 соответственно. Интенсивность восстановления после профилактики и отказа обозначим через μ_1 и μ_2 соответственно.

Используя метод дифференциальных уравнений [1], составим систему уравнений состояний в стационарном режиме с учетом условия нормировки:

$$\begin{cases} -P_0\lambda_1 + P_1\mu_1 - P_2\lambda_2 = 0; \\ P_1\lambda_1 - P_0\mu_1 = 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \tag{7.11}$$

В результате решения системы уравнений (7.11) определяем коэффициент готовности

$$K_{\text{г}} = P_0 = \mu_1\mu_2 \big/ \left[\mu_1\mu_2 + \lambda_1\mu_2 + \mu_1\lambda_2\right]. \tag{7.12}$$

Для практически важного случая $\mu_1=\mu_2=\mu$ определим из (7.12):

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda_1 + \lambda_2}. \tag{7.13}$$

Если интенсивности восстановления и интенсивности отказов подчиняются экспоненциальному закону распределения, то

$$\mu = 1/T_{\text{В}}, \quad \lambda_1 = 1/T_{01}, \quad \lambda_2 = 1/T_{02}, \tag{7.14}$$

где $T_{\text{в}}$ – время восстановления; $T_{01,2}$ - время наработки на отказ.

После подстановки (7.14) в формулу (7.13) получим

$$K_{\text{г}} = \frac{T_{01}T_{02}}{(T_{01}T_{02} + T_{\text{в}}T_{02} + T_{\text{в}}T_{01})}. \tag{7.15}$$

Вероятность безотказной работы $P_{\text{в}}(t_{\text{р}})$ определяется по основной структурной схеме надежности системы, согласно известной методике [1].

7.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что представляет собой ТВС?
2. Чем определяется надежность ТВС?
3. Как разделяются ТВС по топологии?
4. Какие виды топологии широковещательных ТВС существуют?
5. Как определяется коэффициент оперативной готовности ТВС?
6. Построить структурную модель надёжности информационных систем (ИС), имеющую топологию «звезда» с активным центром.
7. Построить структурную модель надёжности ИС, имеющей топологию «общая шина».
8. Построить структурную модель надёжности ИС, имеющей топологию «кольцо».
9. Построить структурную модель надёжности ИС, имеющей топологию «цепочка».

10. Дана структурная модель информационной системы (ИС) (рис. 7.6), где P=0,9; P_1=0,8. Определить вероятность безотказной работы ИС.

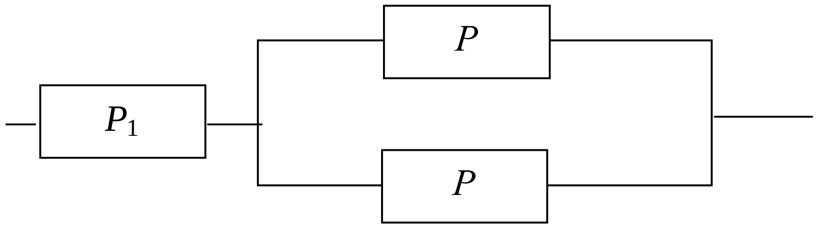


Рис. 7.6

11. Дана структурная модель ИС (рис. 7.7), где P=0,9. Найти вероятность безотказной работы ИС.

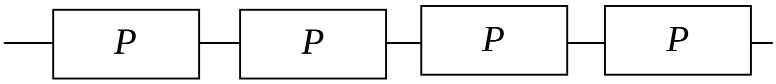


Рис. 7.7

12. Дана структурная модель надёжности ИС (рис.7.8), где P=0,95. Найти вероятность безотказной работы ИС.

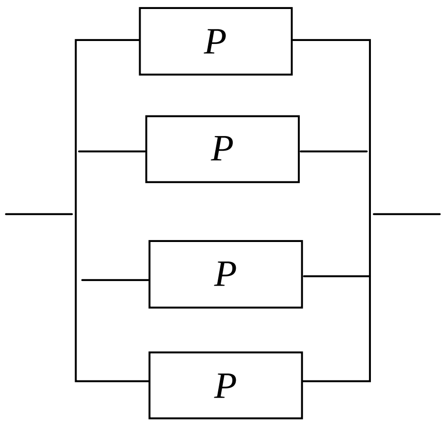


Рис. 7.8

13. Интенсивность отказов компьютера $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ ч$^{-1}$. Найти вероятность безотказной работы компьютера за 8 ч непрерывной работы.

14. Число сбоев компьютеров при тестировании составило 10 из 1 000 решенных задач. Найти вероятность безотказной работы компьютера при решении одной задачи.

15. Тестирование 100 компьютеров происходило в течение 10 суток. Число сбоев было в первые сутки – 1, в последующие двое суток – 2, затем в

течении трех суток – 1, в оставшееся время отказало ещё 2. Найти интенсивность отказов компьютера на интервале от 144 до 240 ч.

16. Из 1 000 дискет в среднем попадается одна бракованная, какова вероятность того, что из выбранных наугад 10 дискет будет не более двух бракованных.

17. Компьютер имеет интенсивность отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ ч$^{-1}$. Найти среднюю наработку на отказ.

18. Сеть подразделения имеет пять компьютеров, вероятность отказов любого 0,001. Найти вероятность отказа из компьютеров.

19. Сеть подразделения имеет пять компонентов, вероятность отказов любого 0,001. Найти вероятность отказа не более двух компьютеров.

20. Найти коэффициент готовности компьютера, если интенсивность отказа $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ ч$^{-1}$, интенсивность восстановления 0,04 ч$^{-1}$.

21. Сеть подразделения состоит из пяти компьютеров, вероятность отказа любого из них 0,001, найти вероятность не менее одного отказа.

22. Сеть подразделения имеет структурную модель надёжности, приведённую на рис. 7.9. Надёжность каждого компьютера 0,95. Найти вероятность безотказной работы сети.

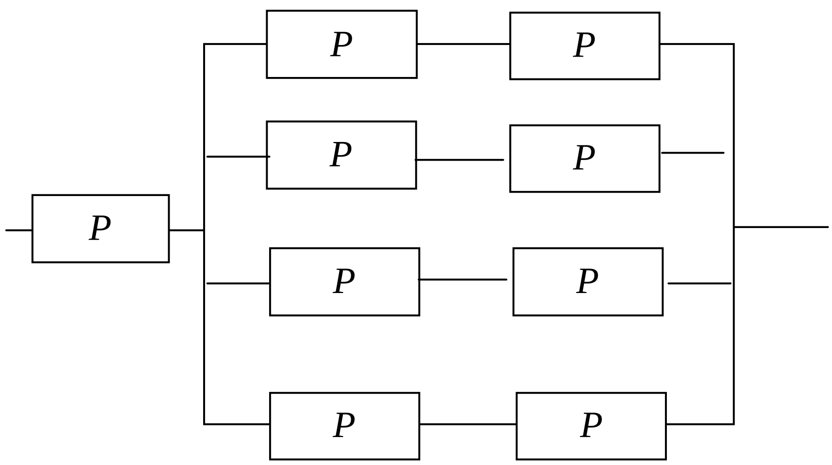


Рис. 7.9

23. Для повышения надёжности бортового компьютера было произведено общее резервирование винчестера с кратностью равной 3. Найти выигрыш в надёжности по отказу , если надёжность одного винчестера 0,95.

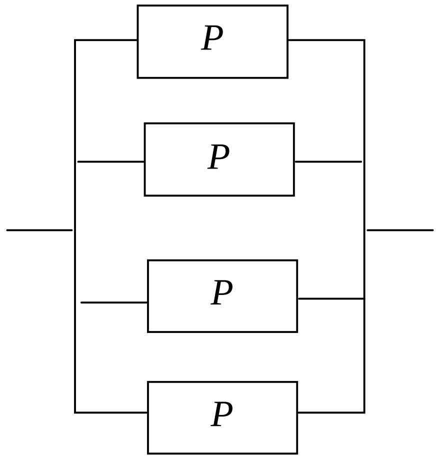


Рис. 7.10

24. На базе войск ПВО имеется сеть компьютеров с числом n=5 . Для повышения надёжности сети использовали поэлементное резервирование третьего порядка. Какой выигрыш в надёжности по отказу получается.

25. Найти надёжность общего резервирования сети из пяти компьютеров, соединённых последовательно при резервировании третьего порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. – Введен 1983. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1983.
2. **Яншин, А.А.** Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА/А.А. Яншин. – М.: Радио и связь, 1983. – 303 с.
3. Сборник задач по теории надежности; под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М.: Сов. радио,1972. – 408 с.
4. **Потехин, В.А.** Применение теории вероятностей к решению задач надежности РЭС/В.А. Потехин, Н.П. Ямпурин. – М.: МАИ, 1991. – 68 с
5. **Фомин, А.В.** Сборник примеров и задач расчета надежности РЭА/ А.В. Фомин, В.Ф. Борисов. – М.: МАИ, 1972. – 118 с.
6. **Пятибратов, А.П.** Вычислительные системы, сети и телекоммуникации/ А.П. Пятибратов, Л.П. Гуденко, А.А. Кириченко. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 508 с.
7. **Липаев, В.В.** Надежность программных средств/ В.В. Липаев – М.: Синтег, 1998. – 232 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Значение интеграла вероятностей φ(z)

z	Сотые доли z									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0040	0080	0120	0160	0199	0239	0279	0319	0359
0,1	0398	0438	0478	0517	0557	0596	0636	0675	0714	0753
0,2	0793	0832	0871	0910	0948	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	1179	1217	1255	1293	1331	1368	1406	1443	!480	1517
0,4	1554	1591	1628	1664	1700	1736	1772	1808	1844	1879
0,5	1915	1950	1985	2019	2054	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	2580	2611	2642	2673	2703	2734	2764	2794	2823	2852
0,8	2881	2910	2939	2967	2995	3023	3051	3078	3106	3133
0,9	3159	3186	3212	3228	3264	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	3413	3437	3461	3485	3508	3531	3554	3577	3599	3621
1,1	3643	3665	3686	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	4332	4345	4357	4370	4382	4394	4406	4418	4429	4441
1,6	4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	4641	4649	4656	4664	4671	4678	4686	4693	4699	4706
1,9	4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	4772	4778	4783	4788	4793	4798	4803	4808	4812	4817
2,1	4821	4826	4830	4834	4838	4842	4846	4850	4854	4857
2,2	4861	4864	4868	4871	4875	4878	4881	4884	4887	4890
2,3	4893	4896	4898	4901	4904	4906	4409	4911	4913	4916
2,4	4918	4920	4922	4925	4927	4929	4931	4932	4934	4936

Баранова Альбина Вячеславовна
Ямпурин Николай Петрович

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Редактор Т.В. Третьякова

Технический редактор Т.П. Новикова

Компьютерная верстка Е.В. Второва

Подписано в печать 30.12.2005. Формат 60 x $84^{1}/_{16}$.
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,25.
Уч.-изд. л. 4. Тираж 350 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ.
Адрес университета и полиграфического предприятия:
603600, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Ямпурин Николай Петрович – выпускник радиотехнического факультета Горьковского политехнического института, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Конструирование и технология РЭС», декан факультета информатики, электроники и приборостроения Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ), автор более 170 работ, в том числе семи изобретений в области систем вычислительного синтеза частот, 11 учебных пособий и монографии.

Баранова Альбина Вячеславовна - выпускница Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского(радиофизический факультет, 1968 г.), старший преподаватель кафедры «Конструирование и технология РЭС» Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ), автор 17 научных работ, в том числе по надёжности аппаратной части информационных систем, а также 5 учебных пособий.