МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра автоматики и телемеханики

К. А. БОЧКОВ, Ю. Ф. БЕРЕЗНЯЦКИЙ

НАДЕЖНОСТЬ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Учебно-методическое пособие для практических занятий
и выполнения контрольной работы

Одобрено методическими комиссиями
факультета безотрывного обучения и электротехнического факультета

2-е издание, переработанное и дополненное

Гомель 2007

УДК 656.25 - 192
ББК 32.965
Б86

Р е ц е н з е н т – заведующий кафедрой «Математические проблемы управления» д-р техн. наук, профессор *И. В. Максимей* (УО «ГГУ им. Ф. Скорины»).

Бочков, К. А.

Б86 Надежность устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб.-метод. пособие для практ. занятий и выполнения контр. работы / К. А. Бочков, Ю. Ф. Березняцкий ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 32 с.
ISBN 978-985-468-363-8

Рассматриваются вопросы расчета надежности систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Предназначено для студентов факультета безотрывного обучения и студентов электротехнического факультета в качестве программированного задания и руководства к решению задач по надежности.

УДК 656.25 - 192
ББК 32.965

ISBN 978-985-468-363-8

ВВЕДЕНИЕ

Системы железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (ЖАТС) призваны в первую очередь обеспечивать безопасность движения поездов. Это обусловливает повышенные требования к показателям надежности таких систем.

Цель практических занятий и решения контрольной работы – развитие у студентов навыков практического решения задач по расчету и сравнению показателей надежности систем ЖАТС.

Необходимым условием успешного выполнения контрольной работы является изучение теоретического материала [1–6], ознакомление с вопросами анализа отказов обслуживаемых устройств по месту работы и, по возможности, использование их при решении предложенных задач.

Контрольная работа для студентов безотрывной формы обучения включает 4 задачи. Они должны быть решены в той же последовательности, в какой поставлены.

Студенты дневной формы обучения решают задачи по заданию и под руководством преподавателя. Порядок решения и методические указания изложены отдельно для каждой задачи.

В конце пособия приведен пример ориентировочного расчета надежности отдельного блока устройства железнодорожной автоматики, который может служить основой для расчета показателей надежности при выполнении курсовых и дипломных проектов.

ЗАДАЧА № 1

Устройство ЖАТС содержит N элементов (реле, резисторы, конденсаторы, интегральные микросхемы, трансформаторы и др.). Через каждые Δt часов работы фиксировались отказы. Статистические данные об отказах, о числе элементов устройства, интервале фиксации отказов и общем количестве отказавших элементов на каждом интервале приведены в таблице 1.

Требуется определить следующие показатели надежности:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказов $Q(t)$;

• интенсивность отказов $\lambda(t)$;

• частость отказов $f(t)$;

• среднее время безотказной работы m_t.

Кроме того, необходимо построить графики $P(t)$, $Q(t)$ в одной системе координат и $\lambda(t)$, $f(t)$ также в одной системе координат.

Параметры условия, выбираемые по первой цифре шифра		Параметры условия, выбираемые по второй цифре шифра											
Циф-ра	Число элементов устройства N	Циф-ра	Интервал фиксаци и отказов Δt, ч	Номер интервала фиксации отказов i									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				Общее количество элементов $n(\Delta t_i)$, отказавших на i-м интервале фиксации									
0, 6	3400	1, 7	180	120	135	150	110	180	160	155	170	190	150
1, 5	5500	2, 9	100	200	235	220	265	210	270	265	265	270	250
2, 8	3700	3, 5	130	85	90	95	80	83	86	96	90	90	80
3, 7	4500	4, 6	110	350	310	296	290	305	325	300	305	290	295
4, 9	4200	0, 8	150	285	260	275	280	270	275	290	260	265	255
Примечание – Для определения своего количества элементов, отказавших на i-м интервале фиксации, студент должен к каждому числу $n(\Delta t_i)$ прибавить третью цифру учебного шифра (или варианта задания для студентов дневной формы обучения).													

Таблица 1 – **Варианты заданий к задаче № 1**

Методические указания к решению задачи № 1

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность устройств ЖАТС – свойство обеспечивать во времени бесперебойное и безопасное управление движением поездов в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта.

Все существующие объекты с точки зрения теории надежности обычно разделяют на две большие группы – невосстанавливаемые и восстанавливаемые.

К *восстанавливаемым* объектам относятся такие, для которых в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации (агрегаты питания, блоки ЭЦ и ГАЦ, дешифраторы и т. д.).

К *невосстанавливаемым* объектам относятся такие, для которых в рассматриваемой ситуации не предусмотрено восстановление работоспособного состояния (интегральные блоки устройств ЖАТС, усилители, двигатели в ряде систем управления и т. п.).

Однако часто встречаются устройства, которые в одни определенные периоды времени являются восстанавливаемыми, а в другие – невосстанавливаемыми. Так, устройство может быть восстанавливаемым в режиме дежурства (ожидание начала выполнения задачи), но в то же время является невосстанавливаемым при выполнении определенной задачи из-за невозможности перерывов самого технологического процесса (система АЛСН в локомотивном депо в период ожидания рейса и система АЛСН во время движения по перегону при автоблокировке без проходных сигналов). Можно привести и более сложный пример, когда одна и та же система может считаться восстанавливаемой или невосстанавливаемой в зависимости от выполнения ею основных функций. Так, система АБ на перегоне в режиме отсутствия поездов является восстанавливаемой, если после возникновения отказа может быть восстановлена ее работоспособность без задержек поездов и нарушения условий обеспечения безопасности движения поездов на участке. В то же время, если отказ приводит к задержке поездов или нарушению условий безопасности движения, то с точки зрения надежности такая система относится к невосстанавливаемой.

При рассмотрении статистических показателей надежности невосстанавливаемых систем будем рассматривать такую схему испытаний, когда несколько образцов работают до полного отказа. В этом случае статистические показатели в пределе, с ростом числа испытаний, будут сходиться по вероятности с аналогичными вероятностными показателями.

В е р о я т н о с т ь б е з о т к а з н о й р а б о т ы $P(t)$ есть событие, при котором в определенный промежуток времени в заданных условиях эксплуатации и интервале времени не произойдет ни одного отказа. Статистическую оценку вероятности безотказной работы можно получить из выражения

$$P(t) = \frac{N(0) - n(t)}{N(0)}, \tag{1}$$

где $N(0)$ – число исправных изделий до начала испытаний;

$n(t)$ – число изделий, отказавших за время t.

В е р о я т н о с т ь о т к а з а $Q(t)$ – это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации и заданном интервале времени появится хотя бы один отказ. Вероятность отказа и вероятность безотказной работы составляют полную группу событий, поэтому

$$Q(t) = 1 - P(t)\ . \tag{2}$$

С т а т и с т и ч е с к а я о ц е н к а и н т е н с и в н о с т и отказов $\lambda(t)$ есть отношение числа отказавших за интервал времени изделий к среднему числу изделий, исправно работающих в данный интервал времени, умноженному на длительность этого интервала:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}}\Delta t_i}, \tag{3}$$

где $N_{\text{ср}} = (N_i + N_{i+1}) / 2$ – среднее число исправно работающих изделий в течение интервала времени Δt_i;

N_i, N_{i+1} – число элементов, исправно работающих в начале и в конце интервала Δt_i.

Вероятностная характеристика статистической оценки интенсивности отказов определяется из выражения

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \tag{4}$$

где $f(t)$ – частость отказов.

Статистическую оценку *частости отказов* можно получить из выражения

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(0)\Delta t}, \tag{5}$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших в интервале времени Δt элементов, которые в случае выхода из строя заменяются новыми;

$N(0)$ – число исправных элементов в начальный (нулевой) момент времени.

Оценка среднего времени безотказной работы

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^{k} n(\Delta t_i) t_{\text{ср}i}}{N(0)}, \tag{6}$$

где k – количество интервалов Δt_i;

$n(\Delta t_i)$ – количество отказавших объектов в i-м интервале;

$t_{\text{ср}i} \geq (t_{i-1} + t_i) / 2$ – среднее значение времени в i-м интервале, t_{i-1} – время начала интервала, t_i – время окончания интервала.

ЗАДАЧА № 2

Установлено, что время работы до отказа дешифратора ДА числовой кодовой автоблокировки имеет распределение, вид которого указан в графе А (предпоследняя цифра шифра) таблицы 2, а параметры распределения – в графе Б (последняя цифра шифра). Требуется определить частость отказов $f(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа $Q(t)$, а также среднюю наработку на отказ дешифратора m_t в интервале времени от t_1 до t_2 с шагом дискретизации Δt, ч (величины t_1, t_2 и Δt указаны в графе А таблицы 2). По вычисленным данным необходимо построить графики $P(t)$, $Q(t)$ в одной системе координат и графики $f(t)$, $\lambda(t)$ также в одной системе координат.

Методические указания к решению задачи № 2

По характеру возникновения принято различать отказы *внезапные,* состоящие в резком, практически мгновенном изменении определяющего параметра, и отказы *постепенные*, происходящие за счет медленного, постепенного изменения этого параметра. Определяющим называют такой параметр, который характеризует основные свойства объекта.

Различные показатели надежности неремонтируемых объектов являются характеристиками случайной величины T – наработки объекта до отказа.

Н а р а б о т к о й называется продолжительность или объем работы изделия, измеряемые в часах, километрах, циклах или других единицах.

Случайная величина времени работы до отказа (наработки на отказ) может быть определена, если известна ее функция распределения $F(t)$.

Основываясь на вероятностных оценках показателей надежности при известных законах распределения времени работы объекта до отказа, необходимо определить показатели надежности.

Известно, что в е р о я т н о с т ь б е з о т к а з н о й р а б о т ы объекта через функцию распределения времени работы объекта до отказа $F(t)$ определяется по выражению

$$P(t) = 1 - F(t), \tag{7}$$

а в е р о я т н о с т ь о т к а з а –

$$Q(t) = F(t). \tag{8}$$

Когда говорят о вероятности безотказной работы в течение (t_1, t_2), обычно имеют в виду условную вероятность безотказной работы $P(t_1, t_2)$ в течение наработки от t_1 до t_2 при условии, что при t_1 объект был работоспособным.

Условная вероятность безотказной работы в течение интервала наработки (t_1, t_2) равна отношению значения функции надежности в конце интервала t_2 к ее значению в начале интервала t_1:

$$P(t_1,t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}. \tag{9}$$

Ч а с т о с т ь о т к а з о в (плотность распределения наработки до отказа)

$$f(t)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}F(t)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}Q(t)=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}P(t). \quad (10)$$

Т а б л и ц а 2 – **Варианты заданий к задаче № 2**

Предпоследняя цифра шифра		Параметры законов	Последняя цифра шифра									
Циф-ра	Вид закона распределения $F(t)$		9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
А		Б										
3, 5	Показательный $t_1 = 500$, $t_2 = 6800$, $\Delta t = 300$ ч	$\lambda \cdot 10^{-4}$, 1/ч	11	3	4	5	4	6	8	6	9	10
2, 6	Нормальный $t_1 = 200$, $t_2 = 2400$, $\Delta t = 200$ ч	m_t, ч	2200	2300	3100	2600	3600	2200	1700	2900	3900	4100
		σ_t, ч	800	1100	900	1000	1300	1000	900	1100	1700	1200
1, 7	Вейбулла $t_1 = 500$, $t_2 = 5000$, $\Delta t = 500$ ч	β	1,1	1,3	1,0	1,7	1,5	1,6	1,6	1,2	1,8	1,9
		c	2000	2030	2100	1920	1950	2070	2150	2170	2220	2260
4, 9	Гамма $t_1 = 100$, $t_2 = 1300$, $\Delta t = 150$ ч	α	4	3	6	7	5	8	6	3	4	7
		$\beta \cdot 10^{-3}$ 1/ч	7	8	10	12	14	12	9	5	6	11
0, 8	Релея $t_1 = 100$, $t_2 = 1500$, $\Delta t = 100$ ч	σ	600	500	750	880	930	950	1130	1290	1100	1200

П р и м е ч а н и е – Выражения для показателей надежности при различных распределениях наработки до отказа приведены в приложении А, интегральная функция Лапласа $\Phi(u)$ – в приложении Б, функция $\Gamma(x)$ для распределения Вейбулла – в приложении В.

Величина $f(t)\mathrm{d}t$ характеризует безусловную вероятность того, что объект откажет на интервале $(t,\ t+\mathrm{d}t)$.

Интенсивностью отказов называется условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента наработки при условии, что до этого момента отказ не возник. Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \tag{11}$$

Величина $\lambda(t)\mathrm{d}t$ характеризует условную вероятность того, что объект откажет на интервале $(t,\ t+\mathrm{d}t)$ при условии, что он был работоспособен в начале интервала.

Следует иметь в виду, что если известен или определен хотя бы один из показателей надежности, то, используя взаимосвязь между ними (приложение Д), можно определить остальные.

Из (10) и (11) имеем при $P(0) = 1$

$$P(t) = e^{-\int\limits_0^t \lambda(\tau)d\tau}. \tag{12}$$

Условная вероятность безотказной работы в течение наработки $(t_1,\ t_2)$, найденная в предположении, что при t_1 объект был работоспособен,

$$P(t_1, t_2) = e^{-\int\limits_{t_1}^{t_2} \lambda(t)\mathrm{d}t}. \tag{13}$$

В качестве показателя надежности неремонтируемых объектов часто используется математическое ожидание наработки до отказа – средняя наработка до отказа

$$m_t = \int\limits_0^\infty t f(t)dt = \int\limits_0^\infty P(t)\mathrm{d}t. \tag{14}$$

Тип распределения наработки до отказа зависит от особенностей процесса развития отказа.

В приложении А приведены формулы для показателей надежности наиболее распространенных распределений. Показательное (экспоненциальное) распределение применяется чаще других. Во-первых, оно характерно для сложных систем, состоящих из разнородных элементов с различными интенсивностями отказов. Во-вторых, при показательном распределении получаются относительно простые формулы для расчета надежности. Показательное распределение можно использовать в тех случаях, когда пренебрегают влиянием приработки, износа и старения.

При нормальном (гауссовом) распределении случайная величина может принимать любые значения – от $-\infty$ до $+\infty$. Поскольку возможные значения случайной наработки до отказа могут быть только положительными, ее распределение может быть лишь усеченным нормальным.

Для усеченного на интервале (t_1, t_2) распределения нормирующий множитель

$$C_0 = \frac{1}{\int\limits_{t_1}^{t_2} f(t)\,dt} \tag{15}$$

условно принимается равным единице, если отношение средней наработки до отказа к среднему квадратическому отклонению наработки до отказа больше 2,5. Функция надежности при нормальном распределении вычисляется с помощью нормированной функции Лапласа

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_0^u e^{-\frac{z^2}{2}} \mathrm{dz} \tag{16}$$

(приложение Б) или других форм табулированных интегралов вероятности. Следует также помнить, что $\Phi(-u) = -\Phi(u)$ и $\Phi(u \geq 5) = 0{,}5$.

ЗАДАЧА № 3

Определить надежность блока железнодорожной автоматики и телемеханики, если известна вероятность безотказной работы отдельных элементов, поток отказов является простейшим, а логическая схема надежности имеет вид, заданный в приложении Г.

Методические указания к решению задачи № 3

Для расчета надежности системы необходимо иметь модель надежности, которая составляется на основе функциональной или электрической схемы (в данном случае модель уже составлена).

Пусть в результате составления логической схемы надежности получилось последовательное соединение элементов, представленное на рисунке 1. Определим вероятность безотказной работы схемы при таком соединении.

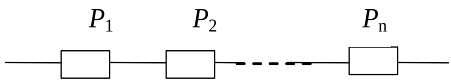


Рисунок 1– Последовательное соединение элементов системы

Вероятность безотказной работы системы (надежность) при последовательном соединении для случая простейшего потока отказов и их независимости равна произведению вероятностей безотказной работы входящих в нее элементов:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \quad \ldots \quad P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t), \qquad (17)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i-го элемента;

n – количество последовательно соединенных элементов.

При *последовательном соединении* надежность системы быстро убывает при увеличении числа последовательно соединенных элементов. При этом надежность системы не превышает надежности самого ненадежного элемента.

Для *параллельного соединения* элементов (рисунок 2), при условии независимости отказов и стационарности их потока, отказ всей системы произойдет лишь после отказа всех ее элементов. В этом случае вероятность отказа всей системы будет равна произведению вероятностей отказов входящих в нее элементов:

$$Q(t) = Q_1(t)Q_2(t) \quad \ldots \quad Q_m(t);$$

$$Q_i(t) = 1 - P_i(t); \quad Q(t) = \prod_{i=1}^{m} \left[1 - P_i(t)\right], \qquad (18)$$

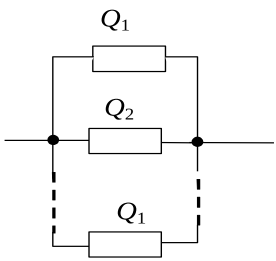


Рисунок 2 – Параллельное соединение элементов

где Q_i – вероятность отказа i-го элемента;

m – количество параллельно соединенных элементов.

Тогда вероятность безотказной работы всей системы

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} \left[1 - P_i(t)\right]. \qquad (19)$$

При увеличении числа параллельно включенных элементов вероятность безотказной работы системы растет, однако абсолютный прирост при этом уменьшается.

При составлении логических схем надежности для сложных многоэлементных систем могут иметь место последовательные и параллельные соединения входящих в нее узлов и элементов.

П р и м е р. Пусть в результате составления логической схемы надежности системы получили схему соединения элементов, представленную на рисунке 3. Необходимо получить выражение для определения надежности всей системы, если известны надежности всех составляющих элементов.

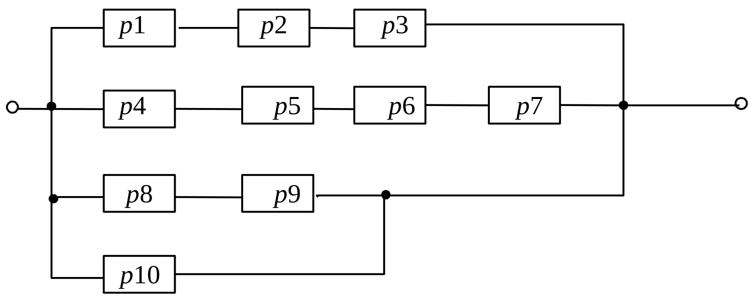


Рисунок 3 – Логическая схема соединения элементов

Логическая схема состоит из четырех цепочек, соединенных параллельно. Для того чтобы воспользоваться (19), следует найти вероятности отказов каждой из цепочек. Применим для расчета выражения (18).

Тогда вероятность отказа для 1-й цепочки – $Q^{\mathrm{I}} = 1 - p_1p_2p_3$, 2-й – $Q^{\mathrm{II}} = 1 - p_4p_5p_6p_7$, 3-й – $Q^{\mathrm{III}} = 1 - p_8p_9$, 4-й – $Q^{\mathrm{IV}} = 1 - p_{10}$.

Вероятность безотказной работы всей системы на основе (19)

$$p = 1 - (1 - p_1p_2p_3)(1 - p_4p_5p_6p_7)(1 - p_8p_9)(1 - p_{10}). \qquad (20)$$

Для случаев более сложных структур (мостиковых, иерархических, лестничных) существуют свои достаточно сложные методы расчета показателей надежности, основанные на методе прямого перебора состояний, методе разложения относительно особого элемента и т. д.

Рассмотрим метод разложения относительно особого элемента для мостиковой структуры (рисунок 4).

Этот метод основан на использовании формулы полной вероятности. При этом в сложной системе выделяется особый элемент, все возможные состояния которого образуют полную группу

$$\sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1. \tag{21}$$

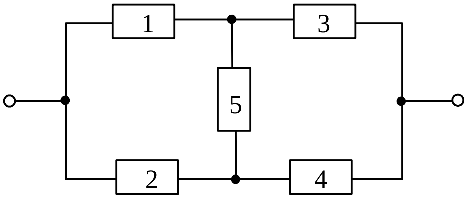


Рисунок 4 – Мостиковая схема соединения элементов

Тогда если рассматривается состояние системы A, то вероятность нахождения в этом состоянии

$$P\{A\} = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) P\{A/H_i\} = \sum_{i=1}^{n} P_i\{A\}. \tag{22}$$

В нашем случае n = 2 (особый элемент может находиться в двух состояниях исправном 1 и неисправном 2).

$P\{A/H_i\}$ – у с л о в н а я в е р о я т н о с т ь – вероятность нахождения в состоянии A при условии, что особый элемент находится в состоянии H_i.

В мостиковой схеме в качестве особого примем элемент 5 в двух его состояниях: исправен – наличие цепи; неисправен – отсутствие цепи, т. е. $P\{H_1\} = p5$, $P\{H_2\} = q5$.

Тогда от исходной мостиковой схемы (см. рисунок 4) при состояниях H_1 и H_2 соответственно имеем варианты, показанные на рисунках 5 и 6.

Если состояния А и А' – наличие цепи между $a - b$ и $a' - b'$, тогда по формуле (18) вероятность безотказной работы для рисунка 5 при $p_1 \ldots p_5 = 0{,}9$ равна $P_1(A) = p_5(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4) = 0{,}882$, а для рисунка 6 вероятность будет $P_2(A') = q_5\left[1 - (1 - p_1p_3)(1 - p_2p_4)\right] = 0{,}0964$.

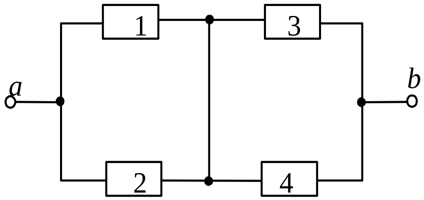


Рисунок 5 – Логическая схема надежности при исправном элементе 5

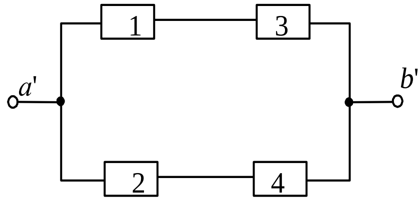


Рисунок 6 – Логическая схема надежности при неисправном элементе 5

Следовательно, для мостиковой схемы соединения элементов в соответствии с (21) вероятность безотказной работы

$$P\{A\} = P_1\{A\} + P_2\{A\} = p_5(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4) + q_5\left[1 - (1 - p_1p_3) \times \right.$$
$$\left. \times (1 - p_2p_4)\right] = 0{,}882 + 0{,}0964 = 0{,}978. \quad (23)$$

В случаях наличия мажоритарных избирательных схем также приходится пользоваться специальными выражениями для расчета их надежности. Мажоритарная избирательная схема ИС (рисунок 7) формирует свой выходной сигнал 0 или 1 в зависимости от состояния 0 или 1, в котором находится большинство элементов на ее входе. Если больше нулей, то на выходе 0, если больше единиц, то на выходе 1.

Надежность всего устройства определяется суммой безотказной работы всех трех устройств и исправной работы любых двух из них, умноженных на вероятность безотказной работы избирательной схемы:

$$P_3^2 = P_{\text{и}}[p^3 + 3p^2(1-p)], \quad (24)$$

где $P_{\text{и}}$, p – вероятности безотказной работы избирательной схемы и основного устройства.

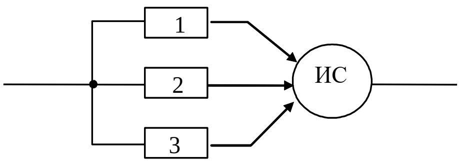


Рисунок 7 – Резервирование по методу голосования

ЗАДАЧА № 4

Система железнодорожной автоматики, состоящая из n последовательно соединенных равнонадежных элементов, резервирована двумя способами А и Б с кратностью резервирования m. Интенсивность отказов одного элемента основной системы равна λ.

Требуется построить графики вероятности безотказной работы $P_с(t)$ в интервале времени от 0 до t с шагом дискретизации Δt, ч, резервированной двумя способами системы, а также рассчитать наработку на отказ $T_с$ каждой из двух схем резервирования. По результатам расчетов сделать вывод, какая из схем резервирования является наиболее эффективной и почему. При расчетах предполагается, что имеет место экспоненциальный закон надежности.

Исходные данные к задаче приведены в таблице 3.

Таблица 3 – **Варианты заданий к задаче № 4**

Параметры условия, выбираемые по второй цифре шифра					Параметры условия, выбираемые по третьей цифре шифра					
Цифра шифра	Способ резервирования		Цифра шифра	Временные параметры t / Δt, ч	Цифра шифра	Количество элементов основной схемы n	Цифра шифра	Кратность резервирования m	Цифра шифра	Интенсивность отказов λ, 1/ч
	А	Б								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0, 9	I	IV	1, 8	1000 / 50	1, 5	6	2, 7	4	0, 3	$0{,}6\cdot10^{-3}$
1, 8	II	IV	2, 5	1500 / 75	2, 6	3	1, 5	3	4, 7	$0{,}2\cdot10^{-3}$
2, 7	III	IV	3, 9	2500 / 125	0, 7	4	3, 6	4	2, 9	$0{,}3\cdot10^{-3}$
3, 6	II	III	4, 7	2000 / 100	4, 9	5	0, 4	2	5, 8	$0{,}4\cdot10^{-3}$
4, 5	I	III	0, 6	1800 / 90	3, 8	2	8, 9	3	1, 6	$0{,}5\cdot10^{-3}$
Примечание – Шифры видов резервирования, используемые во 2-й и 3-й графах таблицы: I – общее с постоянно включенным резервом и целой кратностью; II – раздельное с постоянно включенным резервом и целой кратностью; III – общее резервирование замещением с целой кратностью; IV – раздельное резервирование замещением с целой кратностью.										

Методические указания к решению задачи № 4

Резервирование является основным способом повышения надежности систем. Существует структурное, информационное и временное резервирование [1].

Структурное (аппаратное) резервирование заключается в использовании дополнительной аппаратуры, которая при отказе основной аппаратуры берет на себя ее функции. При этом существует как раздельное (на уровне отдельных элементов), так и общее (на уровне всей системы) резервирование.

При информационном резервировании происходит избыточное кодирование информации, используемой в системе, а при временном резервировании в процессе функционирования система обладает дополнительным ресурсом времени, за счет чего может осуществляться повторный расчет данных или диагностические процедуры.

Постоянное структурное резервирование предполагает наличие резервных элементов, которые работают непрерывно во времени вместе с основными элементами в таком же режиме. При резервировании по методу замещения в случает отказа основного элемента системы он с помощью специального устройства заменяется резервным. Резервные элементы могут находиться в *ненагруженном*, *облегченном* или *нагруженном* (таком же что и основной) режимах.

Рассмотрим используемые в задаче виды резервирования и приведем расчетные формулы при экспоненциальном законе надежности и последовательном соединении равнонадежных элементов основной системы.

Общее резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью (рисунок 8). С учетом выражения (17) и того, что для элементов резервируемой системы справедлив экспоненциальный закон надежности, запишем вероятность безотказной работы, наработку на отказ и интенсивность отказов резервированной системы:

– вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P_{\text{с}}(t) = 1 - (1 - \mathrm{e}^{-\lambda_{\text{о}} t})^{m+1}, \tag{25}$$

где $\lambda_o = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ – интенсивность отказов основной системы;

λ_i – интенсивность отказов элемента основной системы;

n – количество элементов основной системы;

m – кратность резервирования;

– наработка до отказа резервированной системы

$$T_{\text{с}} = \frac{1}{\lambda_o} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{i+1}; \tag{26}$$

– интенсивность отказов резервированной системы

$$\lambda_{\text{с}}(t) = \frac{\lambda_{\text{о}}(m+1)\mathrm{e}^{-\lambda_{\text{о}} t}(1 - \mathrm{e}^{-\lambda_{\text{о}} t})^{m}}{1 - (1 - \mathrm{e}^{-\lambda_{\text{о}} t})^{m+1}}. \tag{27}$$

Общее резервирование для невосстанавливамых систем дает наибольший выигрыш в надежности в области малых значений $\lambda_{\text{о}} t$. Данный вид резервирования целесообразно применять для резервирования достаточно надежных систем разового использования с коротким временем непрерывной работы.

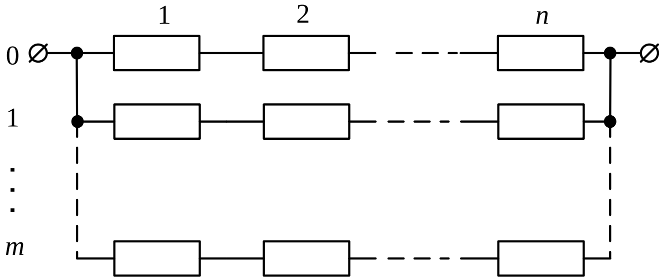


Рисунок 8 – Логическая схема общего резервирования
с постоянно включенным резервом и с целой кратностью

Раздельное (поэлементное) резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью (рисунок 9). Запишем вероятность безотказной работы, наработку на отказ и интенсивность отказов резервированной системы при тех же условиях, что и для предыдущего случая резервирования:

– вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P_c(t) = [1-(1-e^{-\lambda t})^{m+1}]^n; \tag{28}$$

– наработка до отказа резервированной системы

$$T_c = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^{m} \frac{1}{\nu_i(\nu_i+1)\cdot \ldots \cdot(\nu_i+n-1)}, \tag{29}$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента системы. Причем $\nu_i = (i+1)/(m+1)$;

– интенсивность отказов резервированной системы

$$\lambda_c(t) = \frac{n(m+1)\lambda e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^m}{1-(1-e^{-\lambda t})^{m+1}}. \tag{30}$$

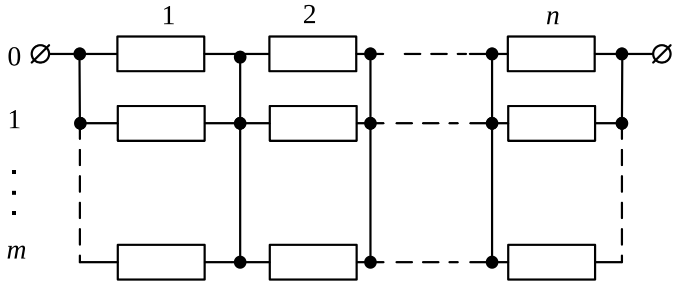


Рисунок 9 – Логическая схема поэлементного резервирования
с постоянно включенным резервом и с целой кратностью

Поэлементное резервирование дает существенное повышение надежности по сравнению с общим резервированием. Оно может эффективно использоваться для повышения надежности сложных систем с большим числом элементов и относительно длительным временем эксплуатации.

П р и м е р. Определить наработку до отказа системы для случая раздельного резервирования с постоянно включенным резервом при количестве элементов основной системы n и кратности резервирования m, равных трем. Интенсивность отказов одного элемента системы $\lambda = 0{,}05 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Используя формулу (29), получим

$$T_с = \frac{(3-1)!}{\lambda(3+1)} \sum_{i=0}^{3} \frac{1}{\nu_i(\nu_i+1)\cdot(\nu_i+2)} = \frac{1}{2\lambda}\left(\frac{1}{\nu_0(\nu_0+1)\cdot(\nu_0+2)} + \frac{1}{\nu_1(\nu_1+1)\cdot(\nu_1+2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\nu_2(\nu_2+1)\cdot(\nu_2+2)} + \frac{1}{\nu_3(\nu_3+1)\cdot(\nu_3+2)}\right).$$

Поскольку $\nu_0 = (0+1)/(3+1) = 1/4$; $\nu_1 = (1+1)/(3+1) = 1/2$; $\nu_2 = 3/4$; $\nu_3 = 1$, то

$$T_с = \frac{1}{2 \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{1/4(1/4+1)\cdot(1/4+2)} + \frac{1}{1/2(1/2+1)\cdot(1/2+2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{3/4(3/4+1)\cdot(3/4+2)} + \frac{1}{1(1+1)\cdot(1+2)}\right) = \frac{1}{0{,}1 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{0{,}25 \cdot 1{,}25 \cdot 2{,}25} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{0{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}5} + \frac{1}{0{,}75 \cdot 1{,}75 \cdot 2{,}75} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3}\right) = 2{,}399 \cdot 10^{6} \text{ ч}.$$

Общее резервирование замещением с целой кратностью (рисунок 10). При таком резервировании функционирует только одна основная система, а остальные находятся в «холодном» резерве и подключатся по мере необходимости специальными переключающими устройствами.

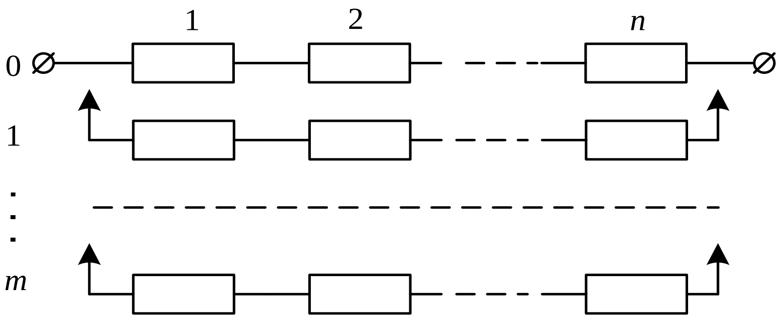


Рисунок 10 – Логическая схема
резервирования замещением с целой кратностью

В случае отказа основной системы она отключается, а на ее место подключается одна из резервных. Поэтому резервированная система откажет при возникновении (m + 1)-го отказа. При этом предполагается, что системы, находящиеся в резерве, отказывать не могут и что переключающее устройство абсолютно надежно.

Запишем вероятность безотказной работы, наработку на отказ и интенсивность отказов резервированной системы:

– вероятность безотказной работы определяется по закону Пуассона:

$$P_{\text{c}}(t) = \mathrm{e}^{-\lambda_{\text{o}} t} \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_{\text{o}} t)^i}{i!} \ ; \qquad (31)$$

– наработка до отказа при данном резерве подчиняется гамма-распределению, параметрами которого являются интенсивность отказов нерезервированной системы λ_{o} и кратность резервирования m:

$$T_{\text{c}} = \frac{m+1}{\lambda_{\text{o}}} \ ; \qquad (32)$$

– интенсивность отказов

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o (\lambda_{\text{o}} t)^m}{m! \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_{\text{o}} t)^i}{i!}} \ . \qquad (33)$$

Данный вид резервирования является эффективным средством повышения надежности даже при достаточно низкой надежности нерезервированной системы и может быть использован для системы с большим сроком службы.

Раздельное резервирование замещением с целой кратностью (рисунок 11). Запишем вероятность безотказной работы, наработку на отказ и интенсивность отказов резервированной системы:

– вероятность безотказной работы

$$P_{\text{c}}(t) = e^{-\lambda_0 t}\left[\sum_{i=0}^{m}\frac{(\lambda t)^i}{i!}\right]^n, \tag{34}$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента системы, $\lambda_{\text{o}} = n\lambda$;

– интенсивность отказов

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o(\lambda t)^m}{m!\sum_{i=0}^{m}\frac{(\lambda t)^m}{i!}}. \tag{35}$$

Такое резервирование при прочих равных условиях позволяет получить наибольший выигрыш надежности по сравнению с другими видами резервирования. Причем, выигрыш получается тем больше, чем больше элементов имеет нерезервированная система.

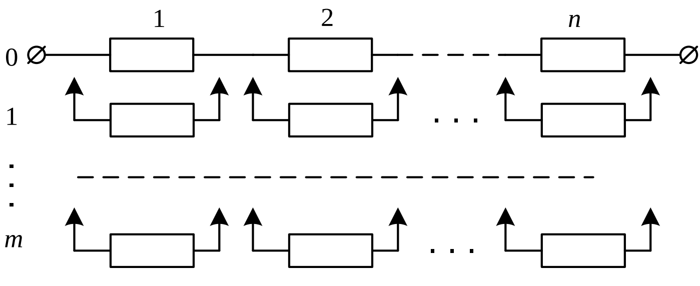


Рисунок 11 – Логическая схема раздельного резервирования замещением с целой кратностью

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ А, Т и С ПО λ-ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Обычно при расчете надежности необходимо определить вероятность безотказной работы. При расчете следует учитывать три вида отказов:

- внезапные отказы;
- постепенные отказы, связанные с изменением характеристик элементов;
- перемежающиеся отказы (сбои), т. е. вероятность безотказной работы устройства определяется при условии независимости каждого из видов отказа:

$$P(t) = P_в(t)P_с(t)P_q(t), \tag{36}$$

где $P_в(t)$, $P_с(t)$, $P_q(t)$ – вероятности безотказной работы соответственно при внезапных отказах, сбоях и постепенных отказах.

Степень точности расчета связана с э т а п а м и п р о е к т и р о в а н и я устройств. На *начальных стадиях* проектирования выполняют лишь ориентировочный расчет надежности, учитывающий только внезапные отказы. При этом вероятность безотказной работы при постепенных отказах (сбоях) принимается равной единице. На *этапах технического проекта* и выпуска рабочих чертежей этот расчет дополняется учетом постепенных отказов и сбоев. При *выпуске опытного образца* производится экспериментальная проверка уровня надежности и вносятся коррективы в расчет.

Ориентировочный расчет надежности начинают с составления логической схемы надежности. Далее определяют вероятность безотказной работы отдельных блоков и узлов, входящих в эту логическую схему и затем, используя правила вычисления при различных соединениях блоков и узлов, определяют вероятность безотказной работы всего устройства. Ориентировочный расчет отдельных блоков производят при следующих д о п у щ е н и я х :

- отказы отдельных элементов являются событиями случайными и независимыми, а поток отказов – простейшим;
- время безотказной работы элементов распределено по экспоненциальному закону, т. е. интенсивность отказов – величина постоянная;
- надежность однотипных элементов считается одинаковой;
- при расчетах принимается основная схема соединения элементов (последовательное соединение);

• вероятность безотказной работы при постепенных отказах и сбоях принимается равной единице.

В качестве исходных данных для расчета берут значения для интенсивности отказов однотипных элементов λ, количество этих элементов n.

Для основного последовательного соединения элементов

$$P(t)=\prod_{i=1}^{n}P_i\,, \qquad (37)$$

где P_i – вероятность безотказной работы однотипных элементов.

При экспоненциальном законе распределения времени работы объекта до отказа вероятность безотказной работы

$$P(t)=e^{-\lambda t}\,. \qquad (38)$$

Если число изначальных элементов n_i, то вероятность их безотказной работы равна $P_i(t)=e^{-n_i\lambda_i t}$, а вероятность безотказной работы всего устройства –

$$P(t)=e^{-\sum\limits_{i=1}^{N}n_i\lambda_i t}\,, \qquad (39)$$

где N – количество типов элементов.

Средние значения интенсивностей отказов элементов получены для лабораторной их работы. Для учета условий работы при ориентировочных расчетах пользуются поправочным коэффициентом k_λ, который имеет значения, приведенные в таблице 4. Этот коэффициент учитывают следующим образом:

$$P(t)=e^{-\sum\limits_{i=1}^{N}k_\lambda n_i\lambda_{\text{ср}}t}\,, \qquad (40)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ – среднее значение интенсивности отказов элементов.

Среднее время безотказной работы

$$T_{\text{ср}}=\frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{N}k_\lambda n_i\lambda_{\text{ср}}}\,. \qquad (41)$$

Т а б л и ц а 4 – **Коэффициент условий эксплуатации аппаратуры**

Условия эксплуатации	Коэффициент k_λ

Лабораторные	1,0
Полевые (наземная аппаратура)	1,5
На кораблях	2,0
На ж.-д. транспорте (на локомотивах)	2,5
На самолетах	4,0
На управляемых снарядах	6,0
На современных ракетах	10,0

П р и м е р. Имеется логический блок устройства железнодорожной автоматики, состоящий из ряда элементов, количество и интенсивности отказов которых приведены в таблице 5. Требуется определить вероятность работы устройства за 100 часов и среднее время наработки на отказ.

Т а б л и ц а 5 – **Количество и интенсивности отказов элементов**

Наименование элемента	Количество элементов n_i	Интенсивность отказа элемента $\lambda_{ср} \cdot 10^{-5}$, 1/ч
Микросхема цифровая	30	0,05
Реле	5	0,10
Сопротивление	20	0,05
Диод	10	0,05
Штепсельный разъем на 30 штырей	1	0,15

Данные расчета сведем в таблицу 6. Для того чтобы воспользоваться выражениями (40) и (41), найдем произведения интенсивностей отказов единичных элементов $\lambda_{ср}$ на их количество n_i (4-я графа в таблице 6). Затем найдем интенсивности отказов с учетом условий эксплуатации. Так как, согласно условию примера, блок является железнодорожным (допустим локомотивным устройством), то необходимо умножить полученные значения на коэффициент $k_\lambda = 2{,}5$. Результат поместим в 5-ю графу таблицы 6.

Т а б л и ц а 6 – **Сводные данные об интенсивностях отказов**

Элементы	n_i	$\lambda_{ср} \cdot 10^{-5}$, 1/ч	$n_i \cdot \lambda_{ср} \cdot 10^{-5}$, 1/ч	$k_\lambda n_i \lambda_{ср} \cdot 10^{-5}$, 1/ч
1	2	3	4	5
Микросхемы	30	0,05	1,5	3,75
Реле	5	0,1	0,5	1,25
Сопротивления	20	0,05	1,0	2,5
Диоды	10	0,05	0,5	1,25
Штепсельные разъемы	1	0,15	0,15	0,375

Необходимая для выражений (40) и (41) сумма интенсивностей 5-й графы в таблице 6

$$\sum_{i=1}^{N} k_\lambda n_i \lambda_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{5} 2{,}5 n_i \lambda_{cp} = 9{,}125 \cdot 10^{-5} .$$

Среднее время наработки устройства на отказ согласно (41)

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{9{,}125 \cdot 10^{-5}} = 10958{,}904 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы за 100 часов согласно (40)

$$P(100) = e^{-9{,}125 \cdot 10^{-3}} = 0{,}991.$$

Для более точного расчета кроме k_λ следует учитывать также температурный коэффициент k_t (таблица 7) и коэффициент нагрузки $k_н$ (таблица 8).

С учетом этих коэффициентов значение интенсивности отказов элементов

$$\lambda = \lambda_{cp} k_\lambda k_t k_н . \qquad (42)$$

Т а б л и ц а 7 – **Температурный коэффициент**

Диапазон температур, ^{0}C	Значение коэффициента
0–10	1,5
10–20	1,0
20–70	1,5
70–100	2,0

Т а б л и ц а 8 – **Коэффициент нагрузки**

Вид нагрузки	Значение коэффициента
Сопротивления 1/10	1,0
Диоды (максимальная)	1,5
Транзисторы (двухкратная максимальная)	2,0
Конденсаторы 1/10	1,0
Конденсаторы (максимальная)	3,0
Конденсаторы (двухкратная максимальная)	6,0

С п и с о к р е к о м е н д у е м о й л и т е р а т у р ы

1 **Сапожников, В. В.** Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников , Вл. В. Сапожников , В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.

2 **Ягудин, Р. М.** Надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – М. : Транспорт, 1989. – 159 с.

3 **Капур, К.** Надежность и проектирование систем / К. Капур , Л. Ламберсон. – М. : Мир, 1980. – 604 с .

4 **Ястребенецкий, М. А.** Надежность автоматизированных систем управления

технологическими процессами / М. А. Ястребенецкий , Г. М. Иванова. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.

5 **Надежность технических систем :** справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Советское радио, 1985. – 606 с.

6 **Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах :** учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов / под ред. Г. В. Дружинина. – М. : Энергия, 1976. – 448 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(*обязательное*)

Формулы для показателей надежности при различных распределениях наработки до отказа

Наименование распределения	Частость отказов	Интенсивность отказов	Вероятность безотказной работы	Средняя наработка до отказа
Показательное	$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$	$\lambda(t)=\lambda$	$P(t)=e^{-\lambda t}$	$m_t=1/\lambda$
Нормальное	$f(t)=\dfrac{C_0}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}}$; $C_0=\dfrac{1}{1/2+\Phi\left(\dfrac{m_t}{\sigma_t}\right)}$	$\lambda(t)=\dfrac{f(t)}{P(t)}$	$P(t)=C_0\left[1/2-\Phi\left(\dfrac{t-m_t}{\sigma_t}\right)\right]$	$\overline{m}_t=m_t+\sigma_t k$; $k=\dfrac{C_0}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(m_t/\sigma_t\right)^2}$
Вейбулла	$f(t)=\dfrac{\beta}{c}(t/c)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{t}{c}\right)^{\beta}}$	$\lambda(t)=\dfrac{\beta}{c}\left(\dfrac{t}{c}\right)^{\beta-1}$	$P(t)=e^{-\left(\frac{t}{c}\right)^{\beta}}$	$m_t=c\Gamma(1+1/\beta)$
Гамма-распределение	$f(t)=\dfrac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}t^{\alpha-1}e^{-\beta t}$	$\lambda(t)=\dfrac{f(t)}{P(t)}$	$P(t)=e^{-\beta t}\sum\limits_{i=0}^{\alpha-1}\dfrac{(\beta t)^i}{i!}$	$m_t=\dfrac{\alpha}{\beta}$
Релея	$f(t)=\dfrac{t}{\sigma^2}e^{-\left(\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)}$	$\lambda(t)=\dfrac{t}{\sigma^2}$	$P(t)=e^{-\left(\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)}$	$m_t=1{,}253\sigma$

П р и м е ч а н и е – Для гамма-распределения функция $\Gamma(\alpha)$ для целых чисел (α = 0,1, 2 ...) может быть найдена по выражениям $\Gamma(\alpha+1)=\alpha!$ и $\Gamma(\alpha+1)=\alpha\Gamma(\alpha)$, а значения функции $\Gamma(x)$ для распределения Вейбулла приведены в приложении В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(*обязательное*)

Значения функции интеграла вероятностей $\left(\Phi(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_0^u e^{-\frac{z^2}{2}}dz\right)$

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,00000	0,00399	0,00798	0,01197	0,01595	0,01994	0,02392	0,02790	0,03188	0,03586
0,1	0,03983	0,04380	0,04776	0,05172	0,05567	0,05962	0,06356	0,06749	0,07142	0,07535
0,2	0,07926	0,08317	0,08706	0,09095	0,09483	0,09871	0,10257	0,10642	0,11026	0,11409
0,3	0,11791	0,12172	0,12552	0,12930	0,13307	0,13683	0,14058	0,14431	0,14803	0,15173
0,4	0,15542	0,15910	0,16276	0,16640	0,17003	0,17364	0,17724	0,18082	0,18439	0,18793
0,5	0,19146	0,19497	0,19847	0,20194	0,20540	0,20884	0,21226	0,21566	0,21904	0,22240
0,6	0,22575	0,22907	0,23237	0,23565	0,23891	0,24215	0,24537	0,24857	0,25175	0,25490
0,7	0,25804	0,26115	0,26424	0,26730	0,27035	0,27337	0,27637	0,27935	0,28230	0,28524
0,8	0,28814	0,29103	0,29389	0,29673	0,29955	0,30234	0,30511	0,30785	0,31057	0,31327
0,9	0,31594	0,31859	0,32121	0,32381	0,32639	0,32894	0,33147	0,33398	0,33646	0,33891
1,0	0,34134	0,34375	0,34614	0,34850	0,35083	0,35314	0,35543	0,35769	0,35993	0,36214
1,1	0,36433	0,36650	0,36864	0,37076	0,37286	0,37493	0,37698	0,37900	0,38100	0,38298
1,2	0,38493	0,38686	0,38877	0,39065	0,39251	0,39435	0,39617	0,39796	0,39973	0,40147
1,3	0,40320	0,40490	0,40658	0,40824	0,40988	0,41149	0,41309	0,41466	0,41621	0,41774
1,4	0,41294	0,42073	0,42220	0,42364	0,42507	0,42647	0,42786	0,42922	0,43056	0,43189
1,5	0,43319	0,43448	0,43574	0,43699	0,43822	0,43943	0,44062	0,44179	0,44295	0,44408
1,6	0,44520	0,44630	0,44738	0,44845	0,44950	0,45053	0,45154	0,45254	0,45352	0,45449
1,7	0,45543	0,45637	0,45728	0,45818	0,45907	0,45994	0,46080	0,46164	0,46246	0,46327
1,8	0,46407	0,46485	0,46562	0,46638	0,46712	0,46784	0,46856	0,46926	0,46995	0,47062
1,9	0,47128	0,47193	0,47257	0,47320	0,47381	0,47441	0,47500	0,47558	0,47615	0,47670
2,0	0,47725	0,47778	0,47831	0,47882	0,47932	0,47982	0,48030	0,48077	0,48124	0,48169

2,1	0,48214	0,48257	0,48300	0,48341	0,48382	0,48422	0,48461	0,48500	0,48537	0,48574
2,2	0,48610	0,48645	0,48679	0,48713	0,48745	0,48778	0,48809	0,48840	0,48870	0,48899
2,3	0,48928	0,48956	0,48983	0,49010	0,49036	0,49061	0,49086	0,49111	0,49134	0,49158
2,4	0,49180	0,49202	0,49224	0,49245	0,49266	0,49286	0,49305	0,49324	0,49343	0,49361
2,5	0,49379	0,49396	0,49413	0,49430	0,49446	0,49461	0,49477	0,49492	0,49506	0,49520
2,6	0,49534	0,49547	0,49560	0,49573	0,49585	0,49598	0,49609	0,49621	0,49632	0,49643
2,7	0,49653	0,49664	0,49674	0,49683	0,49693	0,49702	0,49711	0,49720	0,49728	0,49736
2,8	0,49744	0,49752	0,49760	0,49767	0,49774	0,49781	0,49788	0,49795	0,49801	0,49807
2,9	0,49813	0,49819	0,49825	0,49831	0,49836	0,49841	0,49846	0,49851	0,49856	0,49861
3,0	0,49865		3,1	0,49903	3,2	0,49931	3,3	0,49952	3,4	0,49966
3,5	0,49977		3,6	0,49984	3,7	0,49980	3,8	0,49993	3,9	0,49995
4,0	0,499968									
4,5	0,499997									
5,0	0,4999997									

П р и м е ч а н и е – Значения функции $\Phi(u)$ при величинах u, которых нет в таблице, могут быть найдены линейным интерполированием по формуле

$$\Phi(u) = \{[(u - u_1)\Phi(u_0)] / (u_0 - u_1)\} + \{[(u - u_0)\Phi(u_1)] / (u_1 - u_0)\},$$

где u – аргумент, для которого требуется найти функцию $\Phi(u)$;

$\Phi(u_0)$ и $\Phi(u_1)$ – значения функций для u_0 и u_1;

u_0 и u_1 – аргументы, между которыми находится u в таблице.

.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(*обязательное*)

Значения гамма-функции для распределения Вейбулла

x	Γ(*x*)	*x*	Γ(*x*)	*x*	Γ(*x*)
1,00	1,00000	1,34	0,89222	1,68	0,90500
1,01	0,99433	1,35	0,89115	1,69	0,90678
1,02	0,98884	1,36	0,89018	1,70	0,90864
1,03	0,98355	1,37	0,88931	1,71	0,91057
1,04	0,97844	1,38	0,88854	1,72	0,91258
1,05	0,97350	1,39	0,88785	1,73	0,91467
1,06	0,96874	1,40	0,88726	1,74	0,91683
1,07	0,96415	1,41	0,88676	1,75	0,91906
1,08	0,95973	1,42	0,88636	1,76	0,92137
1,09	0,95546	1,43	0,88604	1,77	0,92376
1,10	0,95135	1,44	0,88581	1,78	0,92623
1,11	0,94740	1,45	0,88566	1,79	0,92877
1,12	0,94359	1,46	0,88560	1,80	0,93138
1,13	0,93993	1,47	0,88503	1,81	0,93408
1,14	0,93642	1,48	0,88575	1,82	0,93685
1,15	0,93304	1,49	0,88595	1,83	0,93369
1,16	0,92980	1,50	0,88623	1,84	0,94261
1,17	0,92670	1,51	0,88659	1,85	0,94561
1,18	0,92373	1,52	0,88704	1,86	0,94869
1,19	0,92089	1,53	0,88757	1,87	0,95184
1,20	0,91817	1,54	0,88818	1,88	0,95507
1,21	0,91558	1,55	0,88887	1,89	0,95838
1,22	0,91311	1,56	0,88964	1,90	0,96177
1,23	0,91075	1,57	0,89049	1,91	0,96523
1,24	0,90852	1,58	0,89142	1,92	0,96877
1,25	0,90640	1,59	0,89243	1,93	0,97240
1,26	0,90440	1,60	0,89352	1,94	0,97610
1,27	0,90250	1,61	0,89468	1,95	0,97988
1,28	0,90072	1,62	0,89592	1,96	0,98374
1,29	0,89904	1,63	0,89724	1,97	0,98768
1,30	0,89747	1,64	0,89864	1,98	0,99171
1,31	0,89600	1,65	0,90012	1,99	0,99581
1,32	0,89464	1,66	0,90167	2,00	1,00000
1,33	0,89338	1,67	0,90330		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(*обязательное*)

Варианты заданий

Последняя цифра шифра		9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Закорачиваются перемычкой точки на схеме	Предпоследняя цифра шифра нечетная	*c-d*	*b-e*	*i-f*	*j-f*	*e-f*	*h-f*	*i-j*	*i-g*	*e-d*	*h-e*
	Предпоследняя цифра шифра четная	*b-c*	*c-d*	*i-f*	*d-f*	*g-h*	*g-e*	*h-e*	*f-e*	*d-e*	*c-e*
П р и м е ч а н и е – Если предпоследняя цифра шифра четная, то берется схема 2, а если нечетная – схема 1.											

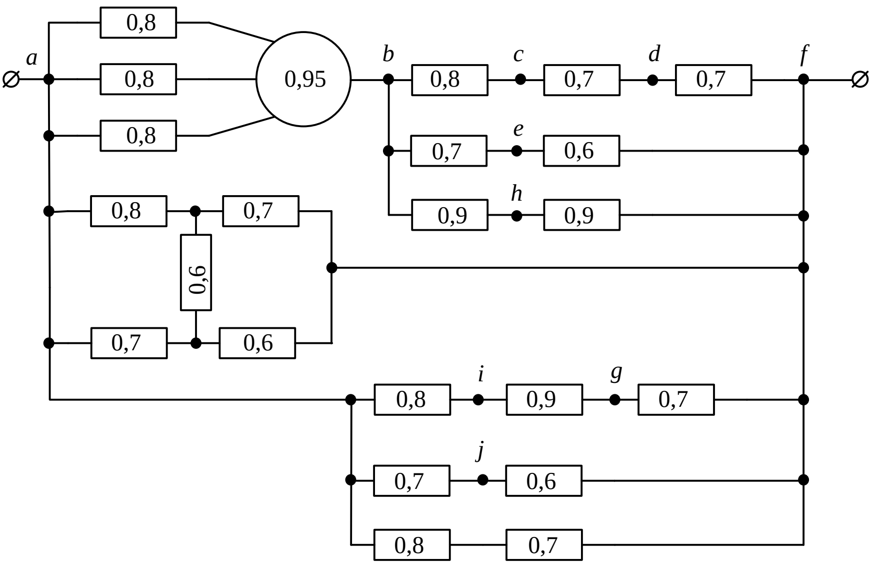
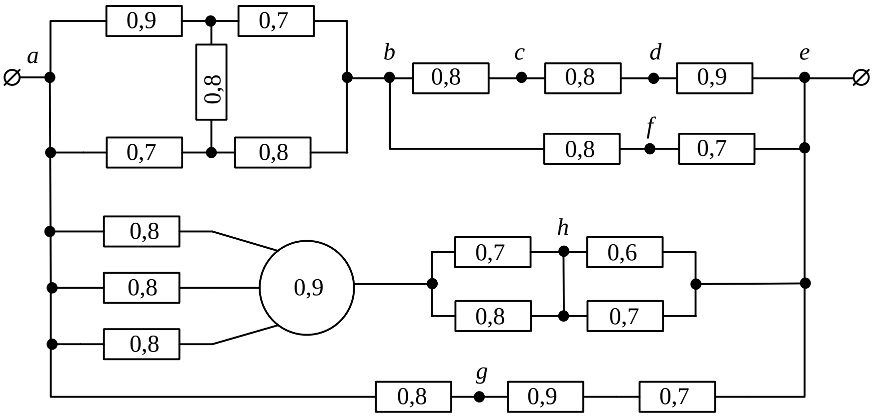


Схема 1



a
b
c
d
e
f
g
h
0,9
0,7
0,8
0,7
0,8
0,8
0,8
0,9
0,8
0,7
0,8
0,8
0,8
0,9
0,7
0,6
0,8
0,7
0,8
0,9
0,7

Схема 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(*обязательное*)

Взаимосвязь между показателями надежности

Известная функция	Определение трех остальных функций через известную			
	$P(t)$	**$Q(t)$**	**$f(t)$**	**$\lambda(t)$**
$P(t)$	–	$1-P(t)$	$-\frac{d}{dt}P(t)$	$-\frac{1}{P(t)}\frac{d}{dt}P(t)$
$Q(t)$	$1-Q(t)$	–	$\frac{d}{dt}Q(t)$	$-\frac{1}{1-Q(t)}\frac{d}{dt}Q(t)$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$\int_0^t f(t)dt$	–	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	$1-e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	$\lambda(t)\cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	–

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
(*рекомендуемое*)

Рабочая программа по дисциплине для студентов ФБО

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Цель изучения дисциплины – подготовка студентов к решению проблем оценки и анализа надежности при изучении конкретных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Изучив дисциплину, студент должен:

– знать основные понятия и математические методы теории надежности элементов и систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, проблему безопасности движения поездов и пути ее решения;

– уметь выполнять расчеты надежности для систем автоматики и связи;

– иметь представление о проблемах надежности, возникающих в связи с современными тенденциями развития микроэлектронной и микропроцессорной техники в области железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

2 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1 Краткая историческая справка по развитию теории надежности. Обеспечение надежности устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (УЖАТС) на этапах жизненного цикла. Особенности УЖАТС с позиций обеспечения надежности.

Тема 2 Понятия надежности и безопасности УЖАТС. Качественные и количественные показатели надежности, статистическое и вероятностное определения. Классификация отказов. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы. Зависимости между вероятностными показателями надежности.

Тема 3 Статистические данные об отказах и показателях надежности элементов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Надежность релейной аппаратуры. Причинный анализ отказов реле. Надежность рельсовых цепей и их элементов. Надежность электроприводов, светофоров и источников питания. Надежность кабельных и воздушных линий связи. Системы и методы сбора и обработки информации об отказах. Способы повышения надежности элементов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Тема 4 Определение показателей надежности по эмпирическим данным. Краткие сведения о потоках распределения случайных величин. Законы распределения времени возникновения отказов. Распределение Вейбулла, определение показателей надежности. Экспоненциальное распределение, определение показателей надежности. Распределение Гаусса, определение показателей надежности. ***U***-образная кривая интенсивности отказов. Понятие о потоках отказов, простейший поток отказов. Показатели надежности восстанавливаемых объектов.

Тема 5 Принципы построения моделей надежности систем. Надежность при последовательном соединении элементов. Надежность при параллельном соединении элементов. Надежность при сочетании последовательного и параллельного соединения элементов. Надежность при мостиковой схеме соединения элементов, метод перебора состояний, метод разложения относительно особого элемента, метод минимальных путей и сечений. Методы резервирования элементов и систем, определение показателей надежности. Резервирование по методу голосования, резервирование элементов с двумя видами отказов.

Тема 6 Назначение и состав ЗИП. Расчет ЗИП невосстанавливаемых и восстанавливаемых УЖАТС. Расчет надежности УЖАТС по λ-характеристикам. Применение методов теории массового обслуживания к задачам надежности.

Тема 7 Анализ надежности микроэлектронных компонентов и микропроцессоров. Виды отказов микросхем и печатных плат. Надежность процессов, запоминающих устройств и интерфейса. Факторы, влияющие на надежность. Влияние электромагнитной совместимости на надежность микроэлектронных систем. Надежность программного обеспечения. Отказы программ. Сравнение аппаратных и программных средств по надежности. Принципы разработки надежного программного обеспечения. Принципы построения надежных и безопасных микроэлектронных УЖАТС.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

БОЧКОВ Константин Афанасьевич,
БЕРЕЗНЯЦКИЙ Юрий Федорович

Надежность устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи

Учебно-методическое пособие для практических занятий и выполнения контрольной работы

Редактор *Т. М. Ризевская.*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 22.11.2007 г. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,75 . Тираж 350 экз.
Заказ № 2618 . Изд. № 119.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра автоматики и телемеханики

К. А. БОЧКОВ, Ю. Ф. БЕРЕЗНЯЦКИЙ

НАДЕЖНОСТЬ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Учебно-методическое пособие для практических занятий
и выполнения контрольной работы

Гомель 2007