Введение

Надежность подвижного состава является одним из важнейших условий, определяющих ритмичную и устойчивую работу электрифицированных железных дорог.

Выполнение контрольной работы имеет своей целью помочь студенту усвоить исходные положения теории надежности и получить первые навыки практических расчетов показателей надежности применительно к подвижному составу. В работе предложено выполнить расчеты для некоторого устройства и колесной пары.

Приступая к выполнению контрольной работы, студент должен, прежде всего усвоить основные термины и определения теории надежности: работоспособное и и справное состояния, отказ и повреждение, внезапный и постепенный отказы, восстанавливаемое и невосстанавливаемое, ремонтируемое и неремонтируемое изделия, предельное состояния, наработка и продолжительность эксплуатации, ресурс, срок службы, безотказность, ремонтопригодность, долговечность, сохраняемость, надежность.

Далее необходимо восстановить в памяти основные положения теории вероятности: случайное событие, вероятность события, статистическая вероятность (частота), сложение и умножение вероятностей, несовместные и независимые события, случайная величина, распределение случайной величины, среднее значение и математическое ожидание случайной величины, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, функция распределения, плотность распределения, принцип практической уверенности, экспоненциальный и нормальный законы распределения, теоремы о числовых характеристиках случайных величин, случайная функция. Важно усвоить связь между вероятностью и статистической вероятностью (частотой) события, средним значением и математическим ожиданием случайной величины. Для выполнения контрольной работы нужно также получить основные представления о повышении надежности путем резервирования. Прежде всего имеется в виду структурное резервирование. Необходимо усвоить понятия: основной и резервный элемент, нагруженный резерв, кратность резерва, дублирование, общее резервирование и др.

После этого студент может перейти к изучению способов расчета единичных и комплексных показателей надежности. В контрольной работе студенту предлагается из множества используемых на практике показателей надежности рассчитать только три: вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа и интенсивность отказов. Эти показатели обычно рассчитываются для невосстанавливаемых объектов, а для восстанавливаемых – только применительно к периоду эксплуатации до первого отказа. Тем не менее, эти показатели достаточно широко используются для оценки безотказности, как на стадии проектирования и испытания объектов, так и при их эксплуатации. Умение рассчитывать указанные показатели дает студенту ключ к расчету других единичных и комплексных показателей надежности и формирует понимание основных закономерностей изменения исправности и работоспособности подвижного состава.

Вся контрольная работа разбита на отдельные задания, отражающие рациональную последовательность освоения материала курса и сопровождаемые методическими указаниями. Выполнение каждого задания завершается контрольным вопросом, который имеет целью помочь студенту лучше осмыслить выполняемую работу и подготовиться к зачету по курсу. При выполнении контрольной работы ответы на контрольные вопросы можно не записывать.

Задания и методические указания

Задание 1. В табл. 1 приведены значения наработок до отказа в находившейся под контролем партии одинаковых устройств.

Таблица 1 – Значения наработки устройства до отказа и заданные значения *t* и T_0.

~~Пред~~последняя цифра шифра	Массив значений наработки до отказа Т, 10^3 ч	Заданное значение t, 10^3 ч	Значение T_0, 10^3 ч
1	2	3	4
0	10, 15, 7, 9, 6, 11, 13, 4, 15, 12, 12, 8, 5, 14, 8, 10, 11, 15, 6, 7, 9, 10, 14, 7, 11, 13, 5, 9, 8, 9, 15, 10, 9, 12, 14, 10, 12, 11, 8, 10, 12, 11, 12, 10, 11, 7, 9	11,5	3,5
1	11, 9, 12, 16, 7, 8, 10, 11, 15, 8, 12, 14, 6, 10, 9, 10, 16, 11, 10, 13, 15, 11, 13, 12, 9, 11, 13, 12, 13, 11, 12, 8, 10, 15, 16 ,8, 10, 7, 12, 14, 5, 16, 13, 13, 9, 6, 11, 9, 12, 14	12,5	4,5
2	12, 17, 9, 11, 8, 13, 15, 6, 17, 14, 14, 10, 7, 16, 10, 13, 15, 10, 12, 13, 17, 8, 9, 11, 12, 16, 9, 13, 15, 7, 11, 10, 11, 17, 12, 11, 14, 16, 12, 14, 13, 10, 12, 14, 13, 14, 12, 13, 9, 11	13,5	5,5
3	13, 12, 15, 17, 13, 15, 14, 11, 13, 15, 14, 15, 13, 14, 10, 12, 17, 18, 10, 12, 9, 14, 16, 7, 18, 15, 15, 11, 8, 13, 11, 14, 16, 11, 13, 14, 18, 9, 10, 12, 13, 17, 10, 14, 16, 8, 12, 11, 12, 18	14,5	6,5

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
4	14, 13, 16, 18, 14, 16, 15, 12, 14, 16, 15, 16, 14, 15, 13, 14, 15, 11, 13, 18, 19, 11, 13, 10, 15, 17, 8, 19, 16, 16, 12, 9, 14, 12, 15, 17, 12, 14, 15, 19, 10, 11, 13, 14, 18, 11, 15, 17, 9, 13, 12, 13, 19	15,5	7,5
5	5, 10, 6, 7, 2, 5, 5, 9, 12, 4, 1, 6, 8, 7, 4, 3, 11, 4, 6, 5, 7, 8, 3, 4, 6, 8, 7, 11, 6, 1, 5, 2, 7, 6, 9, 2, 5, 9, 4, 6, 8, 10, 5, 1, 7, 9, 3, 8, 1, 4	6,5	0,5
6	6, 9, 7, 2, 5, 13, 10, 6, 6, 3, 8, 7, 11, 8, 5, 4, 12, 5, 7, 6, 8, 9, 4, 5, 7, 9, 8, 12, 7, 2, 6, 3, 8, 7, 10, 3, 6, 10, 5, 7, 9, 11, 6, 2, 8, 10, 4, 9, 2, 5	7,5	1,5
7	7, 7, 11, 14, 6, 3, 8, 10, 7, 12, 8, 9, 4, 9, 6, 5, 13, 6, 8, 7, 9, 10, 5, 6, 8, 10, 9, 13, 8, 3, 7, 4, 9, 6, 11, 4, 7, 11, 6, 8, 10, 12, 7, 3, 9, 11, 5, 10, 3, 6	8,5	2,5
8	8, 4, 10, 12, 6, 11, 4, 7, 9, 11, 13, 10, 14, 9, 4, 8, 5, 10, 9, 12, 5, 8, 12, 7, 13, 9, 10, 5, 8, 8, 12, 15, 7, 4, 9, 11, 8, 10, 7, 6, 14, 7, 9, 8, 10, 11, 6, 7, 9, 11	9,5	3,5
9	9, 11, 12, 7, 8, 10, 12, 14, 12, 11, 6, 9, 9, 13, 16, 8, 5, 10, 12, 9, 11, 8, 7, 15, 8, 10, 11, 15, 10, 5, 9, 6, 11, 10, 13, 6, 9, 13, 8, 10, 12, 14, 9, 5, 11, 13, 7, 10, 5, 8	10,5	4,5

Требуется определить статистические вероятности безотказной работы *P(t)* и отказа *Q(t)* устройства для заданного значения *t*, указанного в табл. 1. Далее необходимо рассчитать значение вероятности безотказной работы *P*(t)* по первым 20 значениям наработки до отказа, указанным для соответствующего варианта в табл. 1. Затем для заданной наработки *t* требуется рассчитать математическое ожидание числа работоспособных устройств $\overline{N}_p(t)$ при общем числе находившихся в эксплуатации устройств, указанном в табл. 2.

Таблица 2 – Объем партии устройств и заданное значение *k*

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Объем партии	1000	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Значение *k*	2	6	3	5	4	2	6	3	5	4

Методические указания. Наработка исследуемых устройств до отказа есть непрерывная случайная величина T. По результатам испытания (наблюдения в эксплуатации) партия из N устройств получена дискретная совокупность из N ее значений t_1..., t_i..., t_N указанных в табл. 1.

Статистически вероятность безотказной работы устройства для наработки t определяется как

$$P(t) = \frac{N_p(t)}{N}, \tag{1}$$

где $N_p(t)$ – число объектов, работоспособных на момент времени t. Для определения $N_p(t)$ из табл. 1 следует выбрать значения T, превышающие t.

При выполнении расчетов необходимо быть очень внимательным, поскольку полученные результаты используются в последующем, и ошибка в первом шаге приводит к неверным результатам всех последующих вычислений.

Вероятность отказа устройства за наработку t статистически определяется как

$$Q(t) = \frac{N_{np}(t)}{N}, \tag{2}$$

где $N_{np}(t)$ – число объектов, неработоспособных к наработке t. Для определения $N_{np}(t)$ из табл. 1 следует выбрать значения T, меньшие t.

Поскольку $N_p(t) + N_{np}(t) = N$, нетрудно видеть, чему равна сумма вероятностей: $P(t) + Q(t)$. Подсчет этой суммы используйте для проверки правильности своих вычислений.

Оценку вероятности безотказной работы устройства по первым 20-ти значениям наработки до отказа обозначим как $P^*(t)$. Ее значение определяется также по формуле (1), но при этом N=20, и число работоспособных объектов $N_p(t)$ выбирается из этой совокупности.

Будем считать, что условия опыта, включающего 50 наблюдений, позволили однозначно определить вероятность безотказной работы устройства, т.е. $P(t) = 1 - \mathfrak{F}(t)$. Здесь $\mathfrak{F}(t)$ – функция распределения случайной величины «наработка до отказа», определяющая вероятность события $T \le t$ при $N \to \infty$.

Тогда с учетом формулы (1) математическое ожидание числа объектов $\overline{N}_p(t)$, работоспособных к наработке t, определяется как

$$\overline{N}_p(t) = P(t) \cdot N,$$

где N – объем партии устройств, определяемый по табл. 2.

Контрольный вопрос. Чем объясняется возможное различие значений $P(t)$ и $P^*(t)$?

Задание 2. Требуется рассчитать среднюю наработку до отказа $\bar{T}$ рассматриваемого устройства. Первоначально вычисления произвести непосредственно по выборочным значениям T, указанным в табл. 1, а затем с использованием статистического ряда.

Методические указания. Для вычислений среднего значения $\bar{T}$ случайной величины T непосредственно по ее выборочным значениям t_1, t_2, ..., t_i, ..., t_N используют формулу

$$\bar{\mathrm{T}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i. \tag{3}$$

Уточним, что здесь N равно числу значений T в табл. 1 для заданного Вам варианта. Ошибки, которые можно сделать при расчетах, разделяют на технические и методические. Техническая ошибка является следствием неправильных действий вычислителя (ошибка при введении числа в калькулятор, повторное введение одного и того же числа, пропуск одного или нескольких чисел и т.п.). Методическая ошибка определяется используемым методом и формулами расчета.

Формула (3) не несет в себе методической ошибки, однако расчеты с ее помощью обычно трудоемки и часто приводят к неверным результатам в силу технических ошибок.

Чтобы избежать ошибки, расчеты полезно выполнить, как минимум, дважды, вводя в калькулятор значения t_i первоначально с 1-го значения до *N-го*, а затем с *N-го* до 1-го.

Значительно упростить и ускорить вычисления можно путем использования преобразования результатов наблюдений (совокупности значений t_i) в статистический ряд. С этой целью весь диапазон наблюдаемых значений T делят на m интервалов или «разрядов» и подсчитывают число значений n_i, приходящихся на каждый *i-ый* разряд. Результаты такого подсчета удобно записывать в форме, соответствующей табл. 3.

Таблица 3 – Преобразование значений наработки до отказа в статистический ряд

Интервал		Число попаданий на интервал		Статистическая вероятность
№	Нижняя и верхняя границы, 10^3 ч			
1	8,5÷11,5	//// //// ////	n_1=15	q_1 = 0,15
2	11,5÷14,5	//// //// //// //// //// //// ////	n_2=35	q_2 = 0,35
3	14,5÷17,5	//// //// //// //// //// ////	n_3=30	q_3 = 0,30
4	17,5÷20,5	//// //// //// ////	n_4=20	q_4 = 0,20

Длины Δt всех разрядов чаще всего принимают одинаковыми, а число разрядов m обычно устанавливают порядка 10. Для выполнения данного задания примите $\Delta t = 3 \cdot 10^3$ ч, а $m = 4$. Для примера в табл. 3 указаны результаты систематизации в виде статистического ряда 100 значений случайной величины, распределенной на интервале [$8{,}5 \cdot 10^3$ ч; $20{,}5 \cdot 10^3$ ч], для тех же условий, т.е. $\Delta t = 3 \cdot 10^3$ ч, а $m = 4$.

Заполнять таблицу несложно. Последовательно просматривая массив значений $\{t_i\}$, оценивают к какому разряду относится каждое число. Факт принадлежности числа к определенному разряду отмечают чертой в соответствующей строке таблицы. Затем подсчитывают $n_1, \ldots, n_i, \ldots, n_m$ – число попаданий значений случайной величины (число черточек) соответственно в *1-ый, ..., i-ый, ..., m-ый* разряд. Правильность подсчета определяют, используя соотношение

$$\sum_{i=1}^{m} n_i = N.$$

Нижнюю границу интервала T_0 установите, пользуясь табл. 1.

Статистический ряд можно отразить графически, как показано на рис.1.

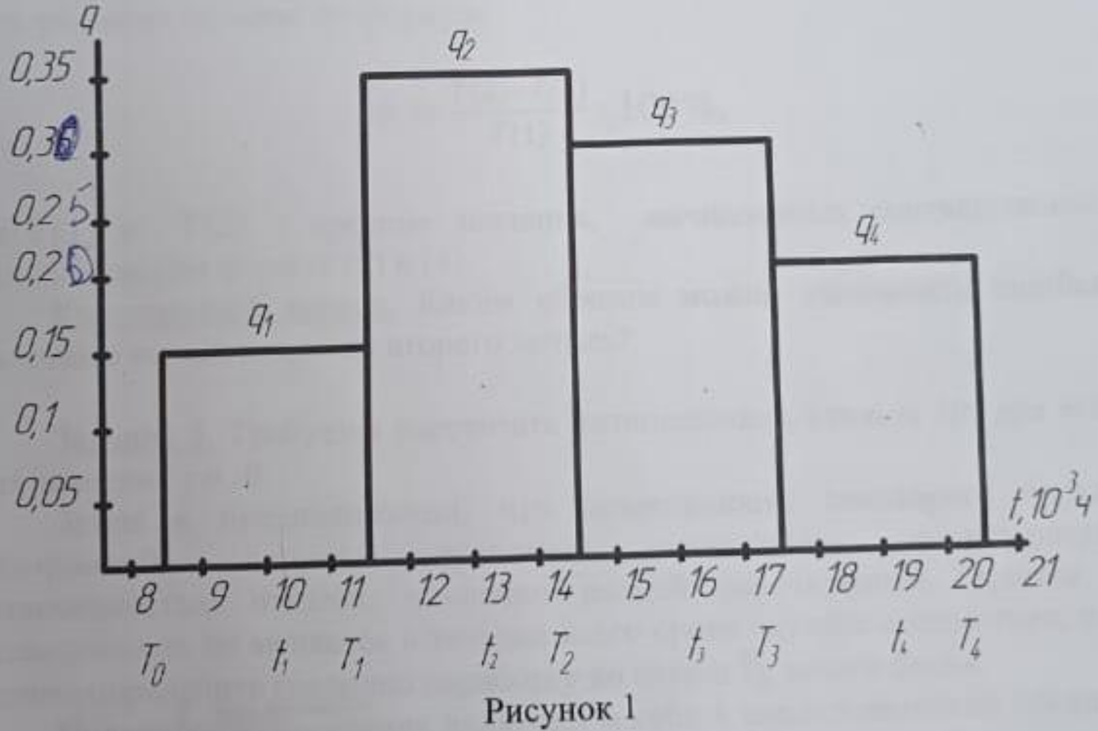

Рисунок 1

С этой целью по оси абцисс отложите разряды постройте прямоугольник, высота которого равна статистической вероятности попадания случайной величины на данный интервал. Здесь $T_1, \ldots, T_i, \ldots, T_m$ соответственно верхние границы *1-го, ..., i-го, ..., m-го* интервалов, определяемые принятыми значениями T_0 и Δt.

Статистическая вероятность q_i попадания случайной величины на *i-ый* интервал рассчитывается как

$$q_i = \frac{n_i}{N}.$$

Подсчитайте значения q_i для всех разрядов и проверьте правильность расчетов, используя выражение

$$\sum_{i=1}^{m} q_i = 1.$$

Для расчета среднего значения случайной величины в качестве «представителя» всех ее значений, принадлежащих *i-му* интервалу, принимают его середину $\bar{t}_i$. Тогда средняя наработка до отказа определяется как

$$\bar{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{m} \bar{t}_i \cdot q_i. \qquad (4)$$

Расчет с использованием формулы (4) вносит некоторую методическую ошибку. Однако ее значение обычно пренебрежимо мало. Эту ошибку в Ваших расчетах оцените по формуле

$$\delta = \frac{\bar{T}(2) - \bar{T}(1)}{\bar{T}(1)} \cdot 100\%,$$

где $\bar{T}(1)$ и $\bar{T}(2)$ – средние значения, вычисленные соответственно с использованием формул (3) и (4).

Контрольный вопрос. Каким образом можно уменьшить ошибки в расчетах с использованием второго метода?

Задание 3. Требуется рассчитать интенсивность отказов $\lambda(t)$ для заданных значений t и Δt.

Затем в предположении, что безотказность некоторого блока в электронной системе управления электровоза характеризуется интенсивностью отказов, численно равной рассчитанной, причем эта интенсивность не меняется в течение всего срока службы локомотива, необходимо определить среднюю наработку до отказа $\bar{T}_{Б}$ такого блока.

Подсистема в системе управления включает в себя k последовательно соединенных электронных блоков (рис. 2).

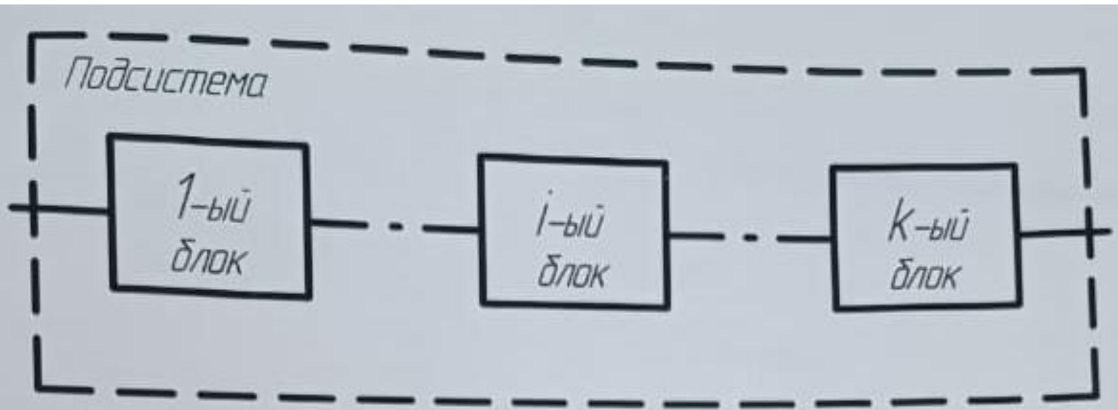

Рисунок 2

Эти блоки имеют одинаковую интенсивность отказов, численно равную рассчитанной. Требуется определить интенсивность отказов подсистемы $\lambda_П$ и среднюю наработку ее до отказа $\bar{T}_П$, построить зависимости вероятности безотказной работы одного блока $P_Б(t)$ и подсистемы $P_П(t)$ к наработке $t = \bar{T}_П$. Значение k указано в табл. 2.

Методические указания. Интенсивность отказов *λ(t)* рассчитывается по формуле

$$\lambda(t) = \frac{q(t,\Delta t)}{P(t)\Delta t}, \tag{5}$$

где $q(t,\Delta t)$ – статистическая вероятность отказа устройства на интервале [t, t+Δt] или иначе – статистическая вероятность попадания на указанный интервал случайной величины *T*;

P(t) – рассчитанная на шаге 1 – вероятность безотказной работы устройства. Напомним, что значение t определяется из табл. 1, а принятое в работе значение $\Delta t = 3 \cdot 10^3$ ч.

Если интенсивность отказов не меняется в течение всего срока службы объекта, т.е. $\lambda(t) = \lambda = const$, то наработка до отказа распределена по экспоненциальному (показательному) закону. В этом случае вероятность безотказной работы блока

$$P_Б(t) = e^{-\lambda t} = \exp(-\lambda t), \tag{6}$$

а средняя наработка блока до отказа находится

$$\bar{T}_Б = \frac{1}{\lambda}. \tag{7}$$

При последовательном соединении k блоков интенсивность отказов образуемой ими подсистемы

$$\lambda_{П} = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i. \qquad (8)$$

Если интенсивность отказов всех блоков одинаковы, то интенсивность отказов подсистемы

$$\lambda_{П} = k\lambda, \qquad (9)$$

а вероятность безотказной работы подсистемы

$$P_{П}(\mathrm{t}) = \exp(-\lambda_{П}\mathrm{t}) = \exp(-\mathrm{k}\lambda\mathrm{t})\,. \qquad (10)$$

С учетом (7) и (8) средняя наработка подсистемы до отказа находится как

$$\bar{T}_{П} = \frac{1}{\lambda_{П}} = \frac{1}{\mathrm{k}\lambda}\,. \qquad (11)$$

Для построения зависимостей $P_{Б}(t)$ и $P_{П}(t)$ можно пользоваться калькулятором или данными табл. 4. Для расчета значений $P_{Б}(t)$ и $P_{П}(t)$ интервал наработки *t* примите равным 400 ч.

График постройте на миллиметровой бумаге, установите максимальное значение *t=5200* ч, но при этом при вычислении $P_{П}(t)$ расчеты можно прекратить, достигнув значения 0,05.

Таблица 4 – Значения функции exp(-x)

x		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,0	0,	-	9900	9802	9704	9608	9512	9418	9324	9231	9139
0,1	0,	9048	8958	8869	8781	8694	8607	8521	8437	8353	8270
0,2	0,	8187	8106	8025	7945	7866	7788	7710	7634	7558	7483
0,3	0,	7408	7334	7261	7189	7118	7047	6977	6907	6839	6771
0,4	0,	6703	6636	6570	6505	6440	6376	6313	6250	6188	6126
0,5	0,	6065	6005	5945	5886	5827	5770	5712	5655	5599	5543
0,6	0,	5488	5433	5379	5326	5273	5220	5168	5117	5066	5016
0,7	0,	4966	4916	4867	4819	4771	4724	4677	4630	4584	4538
0,8	0,	4493	4449	4404	4360	4317	4274	4232	4189	4148	4107
0,9	0,	4066	4025	3985	3945	3906	3867	3829	3791	3753	3716
1,0	0,	3679	3642	3606	3570	3534	3499	3465	3430	3396	3362
1,1	0,	3329	3296	3263	3230	3198	3166	3135	3104	3073	3042
1,2	0,	3012	2982	2952	2923	2894	2865	2836	2808	2780	2753

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,3	0,	2725	2698	2671	2645	2618	2592	2567	2541	2516	2491
1,4	0,	2466	2441	2417	2393	2363	2346	2322	2299	2276	2254
1,5	0,	2231	2209	2187	2165	2144	2122	2101	2080	2060	2039
1,6	0,	2019	1999	1979	1959	1940	1920	1901	1882	1864	1845
1,7	0,	1827	1809	1791	1773	1735	1738	1720	1703	1686	1670
1,8	0,	1653	1636	1620	1604	1588	1572	1557	1541	1526	1511
1,9	0,	1496	1481	1466	1451	1437	1423	1409	1395	1381	1367
2,0	0,	1353	1340	1327	1313	1300	1287	1275	1262	1249	1237
2,1	0,	1225	1212	1200	1188	1177	1165	1153	1142	1130	1119
2,2	0,	1108	1097	1086	1075	1065	1054	1043	1033	1023	1013
2,3	0,0	1003	0993	0983	0973	0963	0954	0944	0935	0926	0916
2,4	0,0	9072	8981	8892	8804	8716	8629	8544	8458	8374	8291
2,5	0,0	8208	8127	8046	7966	7887	7808	7730	7654	7577	7502
2,6	0,0	7427	7354	7280	7208	7136	7065	6995	6925	6856	6788
2,7	0,0	6721	6654	6587	6522	6457	6393	6329	6266	6204	6142
2,8	0,0	6081	6020	5961	5901	5843	5784	5727	5670	5614	5588
2,9	0,0	5502	5448	5393	5340	5287	5234	5182	5130	5079	5029
3,0	0,0	4979	4929	4880	4842	4784	4736	4689	4642	4596	4550

В таблице приведены значения функции *exp(-x)* от 0,00 до 3,00 через 0,01. С целью сокращения объема таблицы приведены только цифры дробной части после нуля целых или нуля целых и нуля десятых. Например

exp(-0,05) = 0,9512;
exp(-2,53) = 0,07966.

Соотношения (8) и (9) справедливы для экспоненциального распределения. Для любого распределения наработки до отказа вероятность безотказной работы подсистемы, состоящей из k последовательно соединенных блоков, связана с вероятностями безотказной работы этих блоков следующим соотношением

$$P_{\Pi}(\mathrm{t}) = \prod_{i=1}^{k} P_i(t)\,. \qquad (12)$$

Если блоки равнонадежны, как принято в задании то

$$P_{\Pi}(\mathrm{t}) = P_{\text{Б}}^{k}(\mathrm{t})\,. \qquad (13)$$

Рассчитав значение $P_{\Pi}(t)$ по формуле (13) для $t = \overline{T}_{\Pi}$, сравните его со значением, рассчитанным по формуле (10).

<u>Контрольный вопрос.</u> В какой период эксплуатации – начальный или по мере приближения к предельному состоянию – интенсивность отказов объектов обычно резко и неуклонно возрастает, и почему?

<u>Задание 4.</u> Для наработки $t = \overline{T}_{П}$ требуется рассчитать вероятность безотказной работы $P_C(T_П)$ системы (рис. 3), состоящей из двух подсистем, одна из которых является резервной.

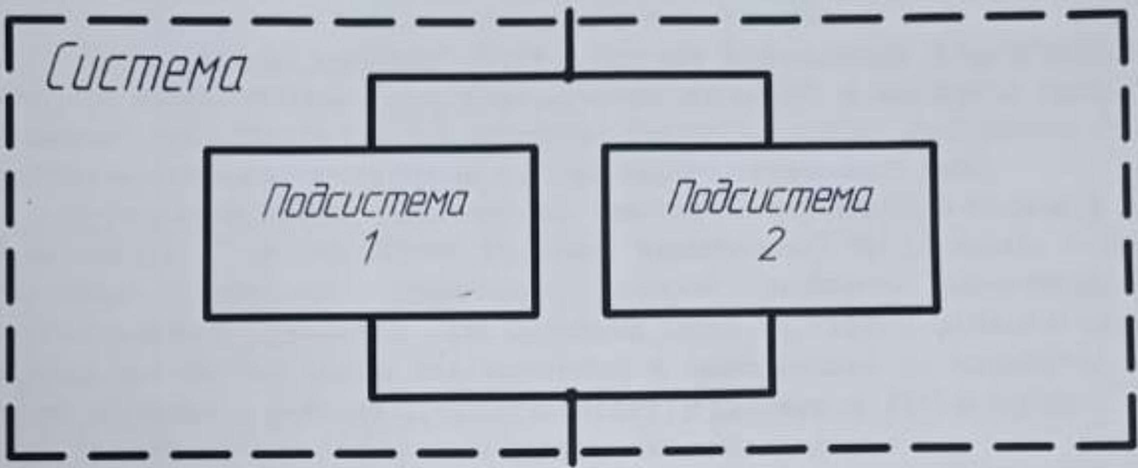

Рисунок 3

<u>Методические указания.</u> Расчет ведется в предположении, что отказы каждой из двух подсистем независимы, т.е. отказ первой системы не нарушает работоспособность второй, и наоборот.

Вероятности безотказной работы каждой подс системы одинаковы и равны $P_{П}(\overline{T}_{П})$. Тогда вероятность отказа одной подсистемы

$$Q_{П}(\overline{T}_{П}) = 1 - P_{П}(\overline{T}_{П}).$$

Вероятность отказа всей системы $Q_C(T_П)$ определяется из условия, что отказала и первая, и вторая подсистемы, т.е.

$$Q_{С}(\overline{T}) = Q_{П}(\overline{T}) \cdot Q_{П}(\overline{T}) = Q_{П}^{2}(\overline{T}).$$

Отсюда вероятность безотказной работы системы

$$P_{С}(\overline{T}) = 1 - Q_{С}(\overline{T}_{П}).$$

или иначе

$$P_{С}(\overline{T}_{П}) = 1 - (1 - P_{П}(\overline{T}_{П}))^{2}.$$

Контрольный вопрос. Какие недостатки Вы видите в принятой схеме резервирования?

Задание 5. По данным табл. 5 требуется определить зависимости от наработки (пробега электровоза) математического ожидания (среднего значения) проката бандажей $\bar{y}(t)$ и дисперсии проката *Д(y(t))*, полученные уравнения необходимо записать. Параметры искомых зависимостей следует рассчитать с использованием правила определения уравнения прямой, проходящей через две точки с известными координатами.

Методические указания. Данное задание выполняется в предположении, что математическое ожидание (среднее значение) и дисперсия проката бандажей представляют собой линейные функции пробега электровоза. Это подтверждается исследованиями, проведенными в различных депо.

Обозначим прокат бандажей как некоторую переменную величину Y. Зависимость Y от наработки (пробега электровоза) представляет собой случайную функцию, реализации которой являются монотонными неубывающими функциями. Для описания такой случайной функции часто вполне достаточно знать, как меняются в зависимости от наработки ее математическое ожидание (среднее значение) и дисперсия: $\bar{y}(t)$ и *Д(y(t))*.

В соответствии с принятым предположением запишем:

Исследования, проведенные в различных депо, показывают, что для описания зависимости проката от пробега электровоза могут быть использованы линейные функции

$$\bar{y}(t) = \bar{y}_0 + at , \tag{14}$$

$$Д(y(t)) = Д(y_0) + bt , \tag{15}$$

где $\bar{y}_0$ и $Д(y_0)$ соответственно – среднее значение и дисперсия проката бандажей при *t=0*, при этом началом отсчета является последняя обточка бандажей;

a – средняя скорость увеличения проката, мм/тыс.км;

b – скорость увеличения дисперсии проката, мм^2/тыс.км;

t – пробег электровоза, тыс.км.

Искомыми параметрами функции (14) и (15) являются $\bar{y}_0$, a, $Д(y_0)$ и b. На практике для нахождения необходимо область возможных значений наработки (нижняя граница которой *t=0*, а верхняя находится из условия достижения предельного значения проката) разбить на несколько (обычно 10-20) интервалов. При каждом из разделяемых этими интервалами пробегов электровоза t_1, t_2, ..., t_i, ..., производят измерения проката большого количества колесных пар и вычисляют соответствующие пробегам средние значения $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$, ..., $\bar{y}_i$, ..., а затем дисперсии $Д(y_1)$, $Д(y_2)$, ..., $Д(y_i)$. Располагая такими наборами значений t_i и y_i или t_i и $Д(y_i)$, можно, используя

Таблица 5 – Результаты обработки измерения износа бандажей колесных пар электровоза

Расчетная величина	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Первое измерение									
Пробег t_1, тыс.км	50	25	75	80	40	60	90	30	65	20
Средний прокат $\bar{y}_1$, мм	1,49	0,81	2,18	2,32	1,22	1,77	2,59	0,94	1,91	0,67
Дисперсия проката $Д(y_1)$, мм^2	0,098	0,050	0,147	0,157	0,079	0,118	0,176	0,060	0,128	0,040
	Второе измерение									
Пробег t_2, тыс.км	150	125	175	180	140	160	190	130	165	120
Средний прокат $\bar{y}_2$, мм	4,24	3,56	4,93	5,07	3,97	4,52	5,34	3,69	4,66	3,42
Дисперсия проката $Д(y_2)$, мм^2	0,292	0,244	0,341	0,351	0,273	0,312	0,370	0,254	0,322	0,234

метод наименьших квадратов, определить искомые зависимости $\bar{y}(t)$ и $Д(y(t))$.

В контрольной работе задача существенно упрощена. Предполагается, что массивы данных о прокате бандажей для каждого t_i уже обработаны. Считается также возможным определить искомые линейные зависимости, располагая координатами только двух точек.

В таком случае параметры a и b зависимостей (14) и (15) могут быть определены соответственно

$$a = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{t_2 - t_1}, \tag{16}$$

$$b = \frac{Д(y_2) - Д(y_1)}{t_2 - t_1}, \tag{17}$$

После этого, используя координаты любой из известных двух точек, например, второй (t_2, $\bar{y}_2$) или (t_2, $Д(y_2)$), можно найти два других параметра

$$\bar{y}_0 = \bar{y}_2 - \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{t_2 - t_1} \cdot t_2 , \tag{18}$$

$$Д(y_0) = Д(y_2) - \frac{Д(y_2) - Д(y_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_2 . \tag{19}$$

Подставив значения (16), (17), (18) и (19) в уравнение (14) и (15), получите выражения, определяющие зависимости от пробега среднего проката бандажей колесных пар и дисперсии проката

$$\bar{y}(t) = \left(\bar{y}_2 - \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{t_2 - t_1} \cdot t_2\right) + \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{t_2 - t_1} \cdot t$$

и

$$Д(y(t)) = \left(Д(y_2) - \frac{Д(y_2) - Д(y_1)}{t_2 - t_1}\right) \cdot t_2 + \frac{Д(y_2) - Д(y_1)}{t_2 - t_1} \cdot t.$$

Произведите необходимые вычисления и запишите полученные выражения (14) и (15) с числовыми значениями параметров.

Контрольный вопрос. Могут ли исходные значения среднего проката бандажей $\bar{y}_0$ и дисперсия проката $Д(y_0)$, соответствующие $t=0$, быть равным 0? Отрицательными числами?

Задание 6. Требуется рассчитать средние значения $\{\bar{y}(t_i)\}$, дисперсии $\{Д(y(t_i))\}$ и средние квадратические отклонения $\{\sigma(y(t_i))\}$ проката при нескольких значениях пробега. Пользуясь зависимостями, полученными на предыдущем шаге. Затем требуется для тех же значений пробега определить нижнюю $y(t_i)_{min}$ и верхнюю $y(t_i)_{max}$ границы практически возможных значений проката. Результаты расчетов следует занести в таблицу, выполненную по форме табл. 6, и построить по ним линии, представляющие собой зависимость среднего проката бандажей от пробега, нижнюю и верхнюю границы практически возможных значений проката.

Таблица 6 – Результаты расчета средних значений, дисперсий и средних квадратических отклонений проката бандажей

Величина	Пробег, тыс.км							
	0	50	100	150	200	250	300	350
1. Средний прокат $\bar{y}(t)$, мм								
2. Дисперсия проката Д$(y(t))$, мм^2								
3. Среднее квадратическое отклонение проката $\sigma(y(t))$, мм								
4. Утроенное значение $3\sigma(y(t))$, мм								
5. Нижняя граница $y(t)_{min}$								
6. Верхняя граница $y(t)_{max}$								

Предельное значение $y_{пр}$ проката бандажей колесных пар электровозов установлено равным 7 мм, а пассажирских электровозов, работающих со скоростями свыше 120 км/ч - 5 мм. На практике обточку бандажей колесных пар всех электровозов, работающих в пассажирском движении, стремятся производить при прокате 5 мм, поэтому при выполнении курсовой работы для грузовых электровозов примите $y_{пр}$ равным 7 мм, а для пассажирских электровозов – 5 мм. Заданная серия электровоза указана в табл. 7.

Таблица 7 – Заданная серия электровоза и пробег $T_{зад}$

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серия электровоза	ЧС2	ВЛ10	ЧС7	ВЛ80^К	ЧС4	ВЛ85	ЧС4^Т	ВЛ80^Р	ЧС2^Т	ВЛ8
Заданный пробег $T_{зад}$, тыс.км	150	240	170	230	190	280	180	260	160	250

Методические указания. Заполните таблицу, последовательно производя вычисления по формулам, полученным при выполнении задания 5, для различных значений пробега электровоза. Расчет среднеквадратических отклонений произведите по формуле

$$\sigma(y_i) = \sqrt{Д(y_i)},$$

где i – номер интервала в табл. 6.

Принятой модели процесса износа бандажа, определяемой выражениями (14) и (15), соответствует такое постепенное увеличение проката, при котором среднее значение и дисперсия приращения проката за некоторый интервал пробега Δt пропорциональны длине этого интервала и не зависят от достигнутого значения y. В таком случае вполне допустимо, основываясь на основных теоремах теории вероятностей, считать, что для любого t_i (пока $y < y_{пр}$) значения проката распределены по нормальному закону с плотностью распределения

$$f(y_i) = \frac{1}{\sigma(y_i)\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y-\bar{y}_i)^2}{2\sigma^2(y_i)}}.$$

Сужение области определения функции $f(y_i)$ до интервала $[0,\ y_{пр}]$ практически не оказывает влияния на результаты расчетов.

Для нахождения области практически возможных значений случайной величины Y_i, распределенной по нормальному закону, пользуются «правилом трех сигма». В соответствии с этим правилом для каждого пробега электровоза t_i верхняя и нижняя границы практически возможных значений проката бандажей находятся как

$$y(t_i)_{\substack{max \\ min}} = \bar{y}_i \pm 3\sigma(y_i)\,. \tag{20}$$

Кривые, показывающие верхнюю и нижнюю границы практически возможных значений проката, определяются выражениями

$$y(t_i)_{max} = \bar{y}_0 + \text{at} + 3\sqrt{Д(y_0) + bt} \tag{21}$$

$$y(t_i)_{min} = \bar{y}_0 + \text{at} - 3\sqrt{Д(y_0) + bt} \tag{22}$$

Полученные зависимости иллюстрирует рисунок 4.

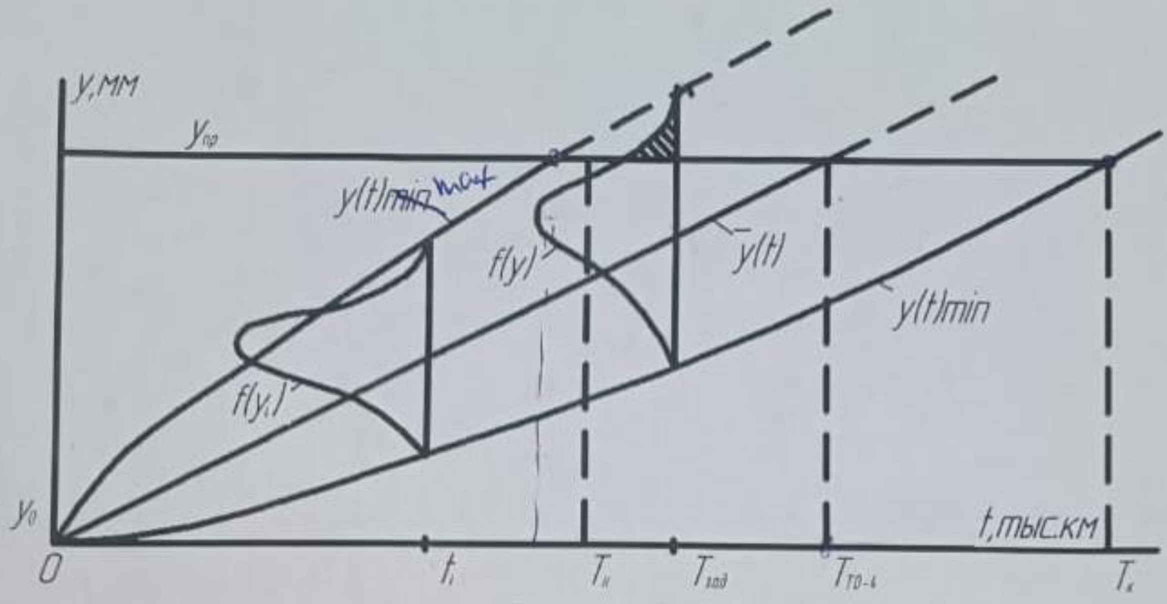

Рисунок 4

Изображая на таких графиках кривую распределения, подразумевают, что оси $f(y_i)$ и $f(y)$ направлены перпендикулярно плоскости t 0 y.

По результатам расчетов, сведенным в табл. 6, постройте график зависимости среднего проката бандажей от пробега (рис.4). Проведите на графике прямую $y = y_{пр}$. Пользуясь данными табл. 5, постройте на этом же графике кривые, показывающие верхнюю и нижнюю границы практически возможных значений проката бандажей. Покажите на графике обе исходные точки $(t_1, \bar{y}_1)$, $(t_2, \bar{y}_2)$ и отметьте их координаты.

При построении графика рекомендуется использовать следующий масштаб: пробег – 1 мм 1 тыс.км, прокат – 1 мм 0,05 мм проката.

<u>Контрольный вопрос.</u> Имеет ли смысл при заданных условиях вычислять значения среднего проката и дисперсии проката для наработки t = 360 тыс. км и более?

<u>Задание 7.</u> Требуется рассчитать $\bar{T}_{ТО-4}$ – средний пробег (наработку) до технического обслуживания ТО-4, а также наименьший $T_Н$ и наибольший $T_К$ практически возможные пробеги до обточки бандажей колесных пар по прокату без выкатки из-под электровоза.

Далее необходимо рассчитать Ψ – вероятность того, что к заданному пробегу $T_{зад}$, будет произведена обточка бандажей колесных пар по прокату без выкатки из-под электровоза.

При расчете вероятности воспользуйтесь графиком, приводимым на рис. 5, или таблицами значений нормальной функции распределения

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt,$$

проводимыми в приложениях к монографиям по теории вероятностей, и в частности в [5].

Методические указания. Техническое обслуживание ТО-4 представляет собой обточку бандажей колесных пар без выкатки из-под электровоза. Факторами, определяющими необходимость производства обточки бандажей колесных пар, могут быть увеличение проката до предельного значения, подрез гребней, появление ползунов или других дефектов на поверхности катания, необходимость уравнять диаметры бандажей колесных пар электровоза после смены одной какой-либо колесной пары и др. В данной работе будем считать, что основной причиной постановки электровоза на ТО-4 является увеличение проката бандажей, что вполне соответствует практике работы большинства депо.

При таком условии средний пробег до технического обслуживания ТО-4 можно рассчитать, подставив в выражение (14) значение $\bar{y}(t) = y_{пр}$

$$\bar{\bar{T}}_{ТО-4} = \frac{y_{пр} - \bar{y}_0}{a}.$$

Чтобы найти практически наименьший $T_Н$ и наиболее поздний $T_К$, сроки производства ТО-4, необходимо подставить $y(t)_{max} = y_{пр}$ и $y(t)_{min} = y_{пр}$ соответственно в выражения (21) и (22). Произведя необходимые преобразования, находим

$$T_Н = \frac{9b + 2(y_{пр} - \bar{y}_0)a - \sqrt{(9b + 2(y_{пр} - \bar{y}_0)a)^2 - 4a^2((y_{пр} - \bar{y}_0)^2 - 9Д(y_0))}}{2a^2},$$

$$T_К = \frac{9b + 2(y_{пр} - \bar{y}_0)a + \sqrt{(9b + 2(y_{пр} - \bar{y}_0)a)^2 - 4a^2((y_{пр} - \bar{y}_0)^2 - 9Д(y_0))}}{2a^2}.$$

На рис. 4 плотность распределения проката при наработке, соответствующей заданному пробегу $T_{зад}$, обозначена как $f(y)$. Часть, лежащая выше $y_{пр}$, является мнимой поскольку превышение предельного значения проката недопустимо. Заштрихованная площадь соответствует вероятности того, что к пробегу $T_{зад}$ уже будет произведена обточка колесных пар. Эта вероятность находится как

$$\Psi = 1 - F(y_{пр}),$$

где

$$F(y_{пр}) = \frac{1}{\sigma(y)\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_{пр}} e^{-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma^2(y)}} dy. \quad (23)$$

В формуле (23) $\bar{y}$ - среднее значение проката, находимое путем подстановки t = $T_{зад}$ в выражение (14). Среднее квадратическое отклонение $\sigma(y)$ рассчитайте путем подстановки t = $T_{зад}$ в выражение (15)

$$\sigma(y) = \sqrt{Д(y_0) + b \cdot T_{зад}}.$$

Интеграл (23) не выражается через элементарные функции, поэтому для его вычисления пользуются таблицами нормальной функции распределения $\Phi^*(x)$. Эта функция характеризует распределение случайной величины X, у которой математическое ожидание равно 0 и $\sigma(x) = 1$.
Выразить функцию распределения (23) через нормальную функцию распределения можно с помощью выражения

$$F(y_{пр}) = \Phi^*(x),$$

где x находится в результате замены переменной как

$$x = \frac{y_{пр} - \bar{y}}{\sigma(y)}.$$

По рассчитанному значению x найдите по таблицам ии с помощью графика, приведенного на рис. 5, значение $\Phi^*(x)$ и далее Ψ. Убедитесь, что в силу симметрии нормального распределения с математическим ожиданием, равным 0, относительно начала координат

$$\Phi^*(-x) = 1 - \Phi^*(x).$$

Контрольный вопрос. Чему равна вероятность обточки колесных пар по прокату к моменту $t = \bar{T}_{ТО-4}$?

Задание 8. Требуется рассчитать минимальное число элементарных проверок. позволяющих определить неисправный элемент на участке цепи включения быстродействующего выключателя (БВ) электровоза ЧС2 (рис. 6), а также определить возможные реализации алгоритма поиска заданного элемента (табл. 8)

Таблица 8 – Отказавший элемент в цепи включения БВ

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Отказавший элемент	7001	0151	0331	0321	0311	2011	343	344	0151	0321
Участок, с которого начинается проверка	Провода 377 - 381					Провода 381 - 373				

<u>Методические указания.</u> Техническим диагностированием называют процесс определения состояния контролируемого объекта. При диагностировании различают рабочие воздействия, которые поступают на объект в процессе его функционирования, и тестовые воздействия на него только для цепей диагностирования. Подавая на объект рабочие или тестовые воздействия, анализируют совокупность признаков или параметров, представляющих собою отклики на эти воздействия. Например, для проверки исправности предохранителя 310 (рис. 6) на провод 300 можно подать напряжение 50 В постоянного тока и убедиться в наличии такого напряжения на проводе 301. Единовременное сочетание подобных воздействий на объект и его ответных реакций составляет одну элементарную проверку. Состав и порядок проведения таких элементарных проверок и правила анализа их результатов определяются алгоритмом технического диагностирования. Различают безусловные алгоритмы диагностирования, у которых порядок выполнения элементарных проверок фиксирован заранее, и условные алгоритмы диагностирования, у которых выбор очередных элементарных проверок определяется результатами предыдущих проверок.

При разработке алгоритмов диагностирования с помощью формализованных методов стремятся получить экономичные, то есть неизбыточные тесты. Для теста диагностирования можно в принципе брать все возможные допустимые входные воздействия на объект. Однако такой тест, как правило, будет избыточным.

Получение неизбыточных тестов и построение рациональных алгоритмов диагностирования базируются на математической теории информации. Согласно этой теории получение информации рассматривается как уменьшение неопределенности суждения о состоянии исследуемого объекта.

При постановке Электровоза на плановый ремонт любой его элемент может быть в одном из двух состояний: исправном или неисправном (при наличии любой *i-й* и *k* возможных неисправностей). Каждому из этих состояний соответствует определенная вероятность.

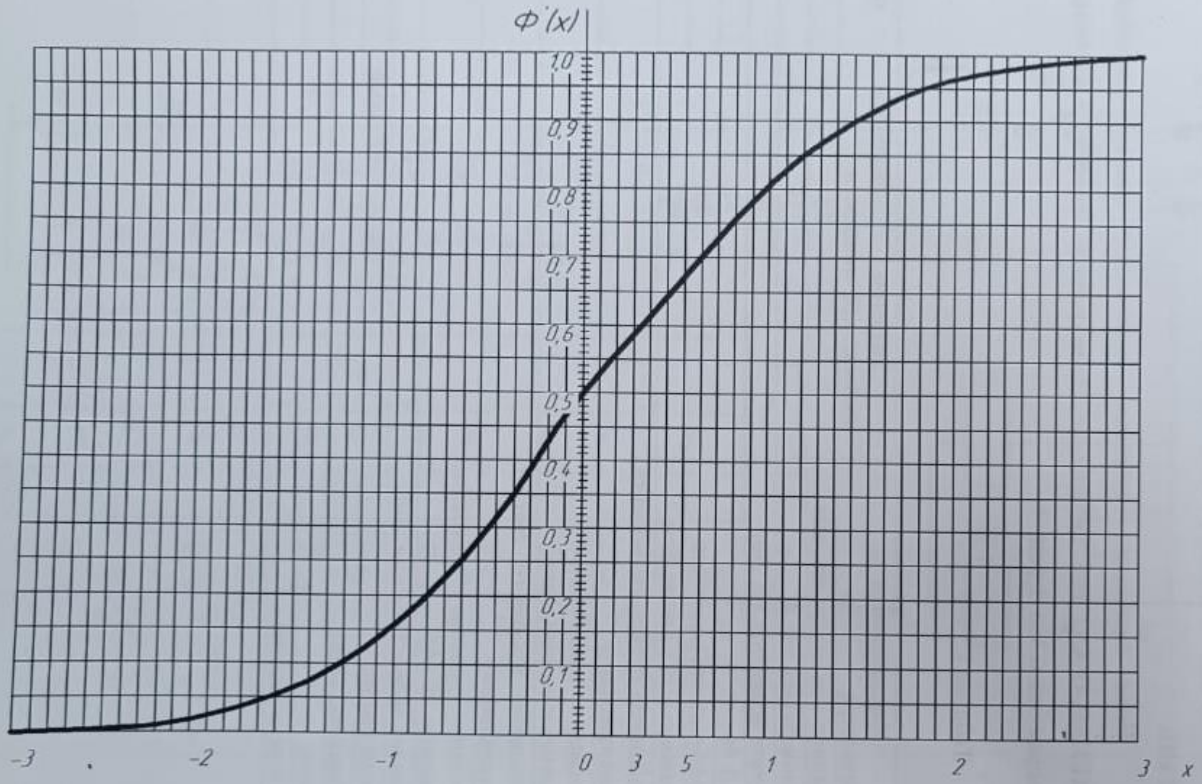

Рисунок 5

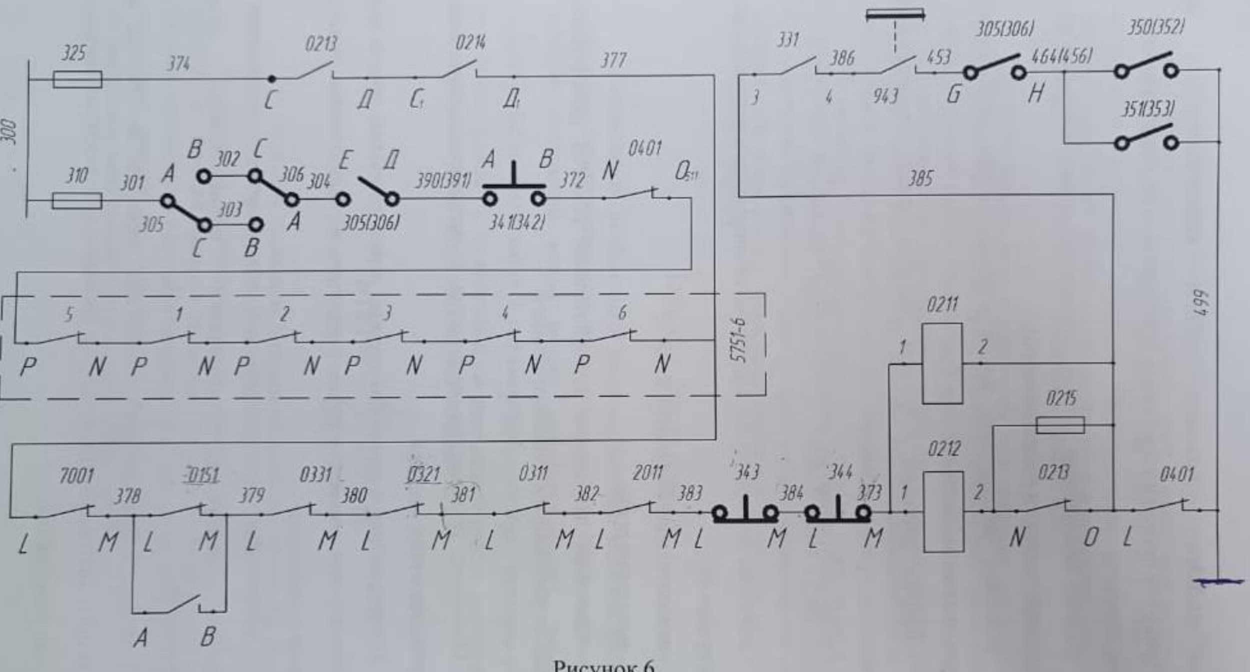

Рисунок 6

Не производя проверки технического состояния элемента дать заключение о его исправности можно лишь с некоторой неопределенностью. Эта неопределенность тем меньше, чем ближе к 1 или 0 вероятность исправного состояния элемента. Максимальная неопределенность соответствует равенству вероятностей исправного и неисправного состояний, т.е. когда вероятность исправного состояния равна 0,5.

Действительно, если вероятность неисправного состояния некоторого элемента равна 0,99, можно практически с полной уверенностью считать, что данный элемент требует ремонта. У неисправного элемента может быть одна из k неисправностей. Предсказать, какая это неисправность, можно лишь с некоторой неопределенностью, причем эта неопределенность тем больше, чем большее число k равновозможных вариантов требуется рассмотреть.

В качестве меры неопределенности опыта, имеющего k равновероятных исходов, условились принять $\log k$. Здесь и далее будет подразумеваться, что основание логарифма равно 2, хотя выбор основания не имеет существенного значения в силу известной формулы перехода от одной системы логарифмов к другой

$$\log_b k = \log_b a \cdot \log_a k.$$

Вероятность любого из k равновозможных исходов опыта равна *1/k*. Поскольку неопределенность всего опыта равна $\log k$, можно считать, что каждый отдельный исход вносит неопределенность, равную $\frac{1}{k}\log k = -\frac{1}{k}\log\frac{1}{k}$. Если опыт имеет k неравновероятностных исходов и вероятность *i-го* исхода равна P_i, то вносимая им неопределенность составляет $-p_i \log p_i$, а неопределенность всего опыта рассчитывается как

$$H(k) = -\sum_{i=1}^{k} p_i \log p_i.$$

Эту величину называют энтропией данного опыта. Ее равенство нулю означает, что исход опыта заранее известен.

В процессе диагностирования объекта энтропия постепенно уменьшается, и полный диагноз выдается, когда она становится равной нулю. Если до проведения *j-го* теста энтропия равнялась H_j, а после его проведения она стала равной H_{j-1}, то разность $J_j = H_j - H_{h-1}$ называют количеством информации, получаемой при осуществлении *j-го* теста.

Наиболее простой тест предполагает получение ответа на вопрос: «Исправен ли объект диагностирования?». Энтропия такого опыта, имеющего два исхода, рассчитывается как

$$H = -p\log p - (1-p)\log(1-p),$$

где p – вероятность исправного, а *(1-p)* – соответственно вероятность неисправного состояний объекта.

График зависимости *H(p)* показан на рис. 7. Как видно из рисунка, наибольшая энтропия характеризует опыт, имеющий два равновероятных исхода. Количество информации, получаемой при осуществлении такого опыта принято за единицу информации и получило название двоичная единица или бит.

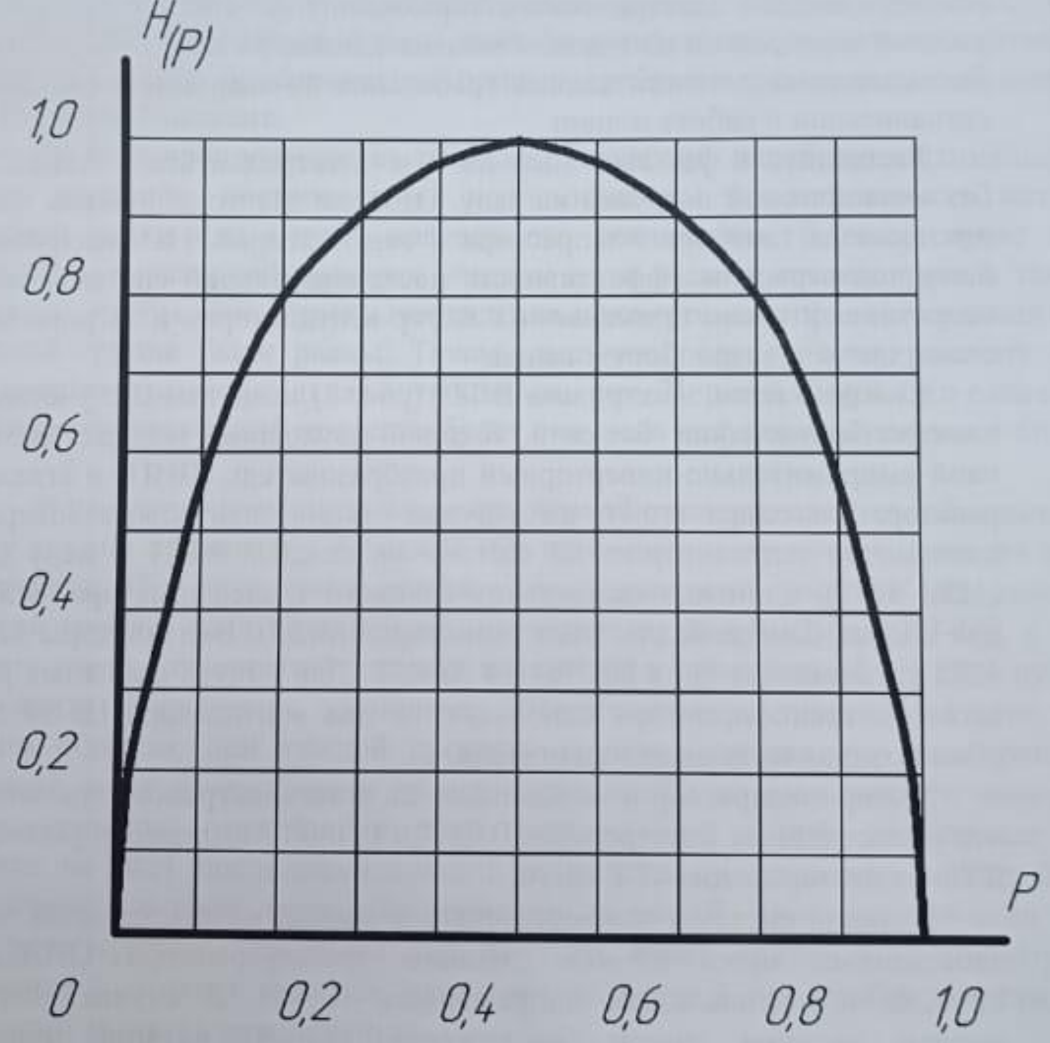

Рисунок 7

Алгоритм диагностирования в общем случае должен строиться таким образом, чтобы каждый тест приносил максимально возможное количество информации. Построение рационального алгоритма диагностирования на примере определения одного неисправного незамкнувшегося контакта в цепи из 16 последовательно соединенных замкнутых контактов представлено на рис. 8. Аналогично решается задача определения элемента с пониженным сопротивлением изоляции в цепи, содержащей $N=16$ одинаковых элементов.

Тривиальный алгоритм состоит в последовательном переборе и проверке исправности каждого элемента. При этом неисправный элемент может быть найден после случайного числа элементарных проверок, равного *1, 2, 3, ..., 15*. (При 15-м испытании проверке подлежит один из двух оставшихся элементов. Любой из результатов этой проверки является исчерпывающим. Например, если окажется, что 15-й элемент исправен, то значит поврежденным является 16-й, и 16-й проверки уже не потребуется).

При равенстве вероятностей отказов элементов среднее число элементарных проверок приблизительно равно $(N+1)/2$. Заметим, что проверка исправности всей цепи здесь не учитывается, поскольку считается известным факт неисправности цепи и требуется установить собственно неисправный элемент.

В противоположность последовательному перебору оптимальным будет алгоритм, построенный с использованием так называемого метода средней точки или метода половинного исключения. В этом случае при каждой элементарной проверке участок цепи делится на две группы таким образом, чтобы вероятности нахождения искомого неисправного элемента в каждой группе были равны. Такому значению вероятности, равному 0,5, соответствует максимальная энтропия (см. рис. 7), равная $\log 2$. Это означает, что в результате одной проверки будет получена информация, равная 1 биту.

В рассматриваемом примере при первой проверке следует, объединив в одну группу элементы 1-8 (или 9-16), проверить исправность цепи из этих элементов. При получении ответа «да» (отказавший элемент находится в другой группе) следует перейти к проверке группы 9-12 (или 13-16), а при ответе «нет» (отказавший элемент находится в проверяемой группе) нужно проверить исправность элементов, объединенных в группы 1-4 или 5-8. Таким образом, при каждой проверке группу, содержащую неисправный элемент, сразу же разбивают на две части, чтобы по возможности получить равновероятные ответы. Алгоритм, включающий в себя возможные (но далеко не все) последовательности элементарных проверок, может быть представлен в виде дерева, показанного на рис. 8. Заметим, что если при контроле группы элементов 1-2 получен ответ «нет», а при контроле элемента 1 – ответ «да», то проверять элемент 2 нет необходимости, он заведомо является неисправным.

Количество информации, которую приносит поиск отказавшего элемента, равно $\log 16$ бит. Каждая элементарная проверка при использовании

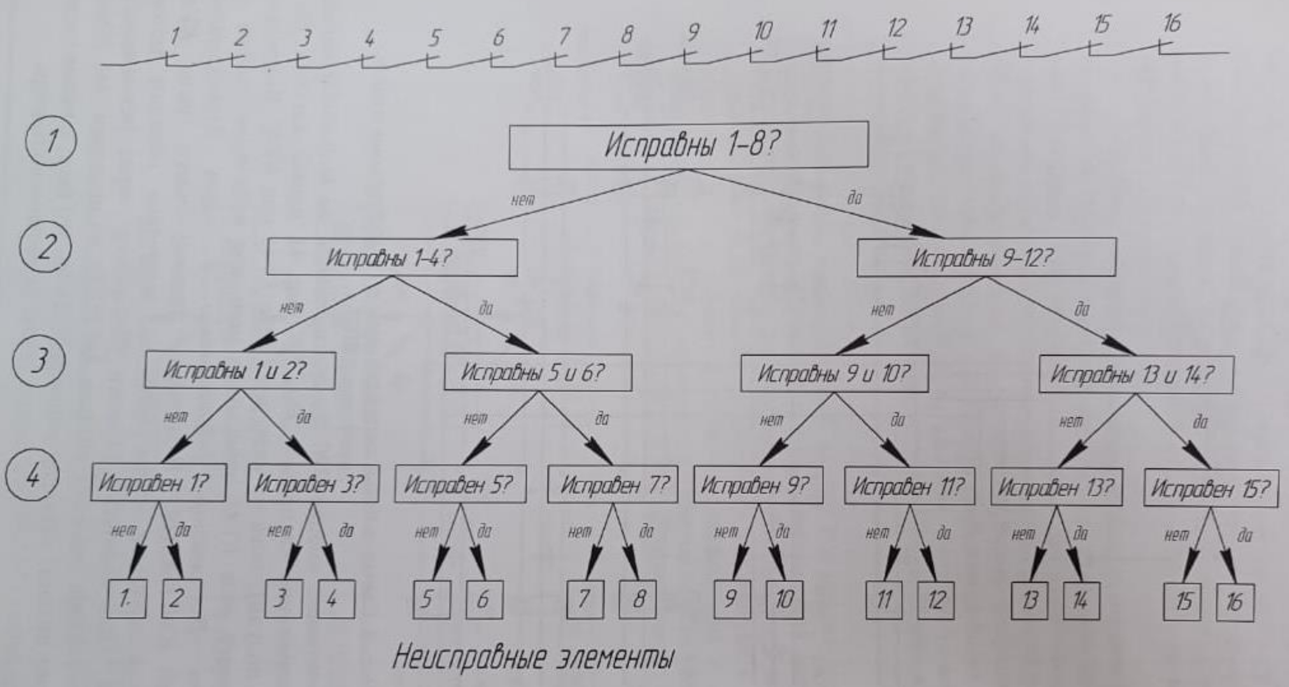
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
1
2
3
4
Исправны 1–8?
нет
да
Исправны 1–4?
Исправны 9–12?
Исправны 1 и 2?
Исправны 5 и 6?
Исправны 9 и 10?
Исправны 13 и 14?
Исправен 1?
Исправен 3?
Исправен 5?
Исправен 7?
Исправен 9?
Исправен 11?
Исправен 13?
Исправен 15?
1. 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
Неисправные элементы

Рисунок 8

метода средней точки уменьшает энтропию на $\log 2 = 1$ бит. Требуемое число элементарных проверок находится как $\log 16 / \log 2$. Таким образом, не считая первой элементарной проверки, любой отказавший из 16 элементов может быть найден за 4 проверки. Нетрудно рассчитать, что для поиска из 32 элементов 1-го отказавшего, требуется 5, а из 64 – только 6 элементарных проверок.

Отметим, что при различных вероятностях отказов элементов, принцип деления на группы с равными вероятностями отказов сохраняется. В реальных условиях при построении алгоритма диагностирования требуется учитывать стоимость отдельных проверок. В стоимости учитываются прежде всего затраты времени на подготовительные операции, перемещение в труднодоступные места и т.п. Иногда оказывается более выгодным отдавать преимущество тем проверкам, которые, хотя и не отличаются большой информативностью, позволяют быстрее и с меньшими затратами оценить состояние объекта.

Алгоритм, представленный на рис. 8 и реализующий метод половинного исключения, не является единственным. Для цепи из 16 элементов существуют 16 возможных реализаций алгоритмов, 2 из которых представлены на рис. 9. В варианте *а* проверка начинается с элементов 1-8, а в варианте *б* – с элементов 9-16. В соответствии с заданием требуется определить возможные реализации алгоритма поиска неисправного элемента на участке между проводами 377 и 373 цепи включения БВ электровоза ЧС2 (см. рис.6).

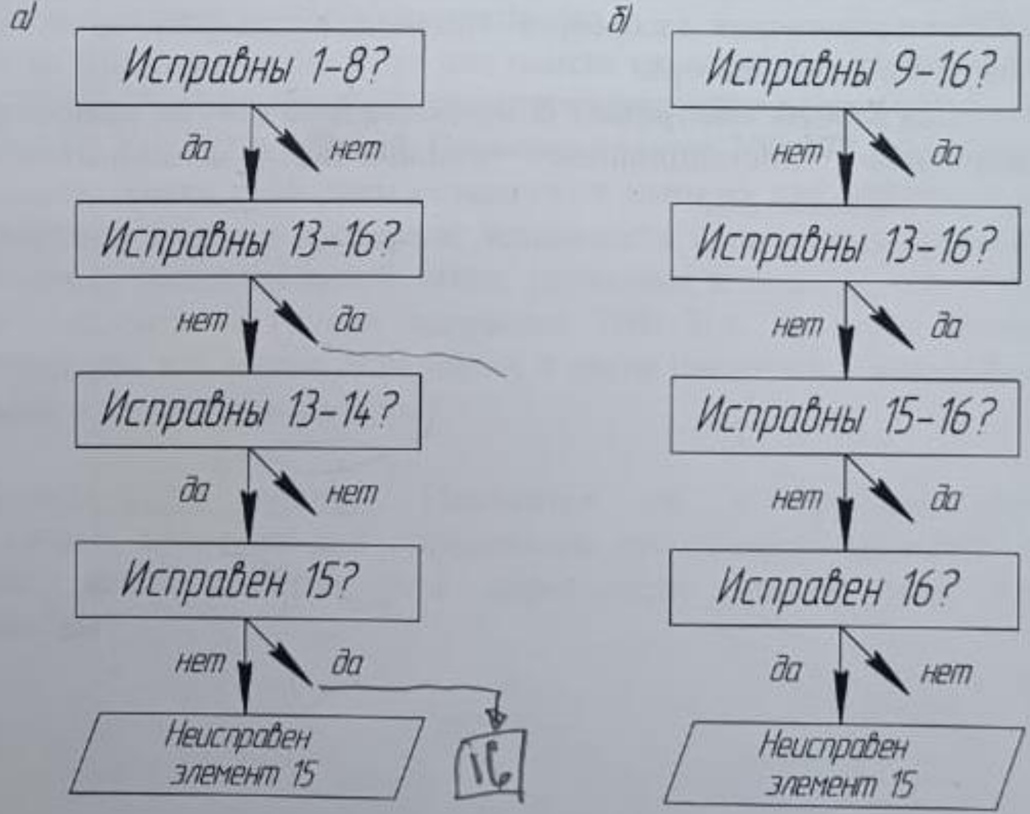

Рисунок 9

Включение этого аппарата происходит при одновременной подаче напряжения 50 В постоянного тока на включающий (удерживающий) электромагнит 0212 и электропневматический вентиль 0211. Заметим, что в схемах электровоза ЧС2 к схемному номеру аппарата при обозначении его составляющей части добавляются одна-две цифры. Так, БВ обозначается как 021, его указанные выше элементы – 0211 и 0212, блокировочные контакты 0213 и 0214, а резистор в цепи удержания электромагнита – 0215. Для включения БВ в действующей кабине управления (№1 или №2) переводят в рабочее положение пакетный выключатель управления (соответственно 305 или 306), при этом замыкаются его контакты *АВ*, *ЕД*, и *GH*. После нажатия кнопки 341(342) в соответствующей кабине получают питание электромагнит 0212 и электромагнитный вентиль 0211. Однако при этом должны находиться в замкнутом состоянии блокировочные контакты *NO* и *LM* главного переключателя 04 (замкнуты только на 0-1 позиции), контакты *LM* реле защитной группы 700 (перегрузки цепи электрического обогрева вагонов), 015 (дифференциальной защиты силовой цепи). 033, 032, 031 (перегрузки трех тяговых двигателей), 201 (дифференциальной защиты вспомогательных машин), контакты *LM* кнопок 343 и344 выключения БВ (соответственно в кабинах №1 и №2), а также контакты *PN* блинкеров 1-6 сигнализатора срабатывания реле защитной группы 575. После включения БВ и перевода главного переключателя с позиции 0 удержание аппарата осуществляется по цепи, включающей его контакты *СД* 0213 и $C_1Д_1$ 0214, контакты промежуточного реле защиты 331, контакты автоматического выключателя управления (*АВУ*) 943, контакты *GH* 305 (306) и контакты 350 (352) и 351 (353) выключателей токоприемников.

Если БВ не включился, то для поиска отказавшего элемента всю цепь целесообразно разбить на 4 участка, соответственно между проводами 300-511, 511-377, 377-373 и 373-499. Проверив участок 300-377, убеждаемся в его исправности. Тогда разбиваем оставшуюся цепь на два участка с равными вероятностями отказа и проверяем исправность цепи между проводами 373-499. Получив положительный ответ, приходим к выводу, что отказавший элемент находится в группе элементов 7001-314. За какое минимальное число проверок его можно определить и какие реализации алгоритма поиска отказавшего элемента возможны?

<u>Контрольный вопрос.</u> Изменится ли в среднем количество элементарных проверок для определения отказавшего элемента в группе 7001-342, если известно, что вероятности отказа этих элементов неодинаковы?