

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра “Експлуатація та ремонт рухомого складу”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до практичних занять з розв’язання задач
з дисципліни**

***«ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ, ТЕХНІЧНОЇ
ДІАГНОСТИКИ І МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ»***

Харків 2009

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу» 8 жовтня 2007 р., протокол № 28.

Рекомендуються для студентів спеціальності "Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту" спеціалізації 7.100501.01 "Виробництво, експлуатація та ремонт локомотивів" денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

професори Е.Д. Тартаковський,
А.П. Фалендиш,
доценти О.В. Устенко,
О.С. Крашенінін,
асист. С.В. Михалків

Рецензент

проф. В.Ф. Головка

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з розв'язання задач
з дисципліни

*«ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ, ТЕХНІЧНОЇ
ДІАГНОСТИКИ І МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ»*

Відповідальний за випуск Михалків С.В.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 26.12.07 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,75. Обл.-вид.арк. 2,0.

Замовлення № Тираж 100. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Експлуатація та ремонт рухомого складу»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з вирішення задач з дисципліни
«Основи надійності, технічної діагностики і моніторингу
технічного стану тягового рухомого складу»

для студентів спеціальності
«Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного
транспорту
(Локомотиви)»
денної та заочної форм навчання

Харків 2008

Методичні вказівки розглянуті та рекомендовані до друку на засіданні кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу» 2007 року, протокол № 23.

Рекомендовано для студентів денної та заочної форм навчання по спеціальності «Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту» спеціалізації 7.100501.01 «Виробництво, експлуатація та ремонт локомотивів»

Укладачі:

проф. Е. Д. Тартаковський

проф. А. П. Фалендиш

доценти О. В. Устенко

О. С. Крашенінін

асистент С. В. Михалків

Рецензент

проф. В. Ф. Головка

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Оцінка надійності локомотивів і їх агрегатів з різними структурними схемами	4
2 Вибірковий контроль якості продукції	9
3 Статистична обробка даних спостережень	9
4 Закони розподілу випадкових величин	12
5 Оцінка значень параметрів за результатами обмеженої кількості випробувань	14
6 Розрахунок елементів конструкцій з урахуванням розсіювання значень параметрів	16
7 Визначення показників надійності	17
8 Елементи технічної діагностики	20
Приклади розв'язання задач	23
Список літератури	29

ВСТУП

Залізничний транспорт потребує значної уваги щодо підвищення його ефективності. У сучасних умовах залишається актуальним завдання наукового обґрунтування оптимального співвідношення між надійністю роботи його обладнання і витратами на його створення й утримання.

Сучасний інженер повинен вміти розв'язувати задачі розрахунку надійності локомотивів у цілому і його окремих агрегатів зокрема.

Методичні вказівки містять типові й оригінальні задачі, що відносяться до розрахунку технічних систем. Наводяться задачі з актуальних питань надійності й технічної діагностики, а також інших розділів дисципліни «Основи надійності, технічної діагностики і моніторингу технічного стану ТРС».

Наводяться приклади розв'язання типових задач із необхідними поясненнями й посиланнями на літературні джерела.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Рухомий склад і спеціальна техніка залізничного транспорту (Локомотиви)» денної та заочної форм навчання, а також можуть бути корисними для інших спеціальностей, де проводяться розрахунки надійності технічних систем.

1 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЛОКОМОТИВІВ І ЇХ АГРЕГАТИВ З РІЗНИМИ СТРУКТУРНИМИ СХЕМАМИ

1.1 Локомотив подано у вигляді п'яти послідовно з'єднаних елементів (агрегатів). Знайти ймовірність безвідмовної роботи локомотива, якщо ймовірності безвідмовної роботи його елементів однакові й дорівнюють 0,9.

1.2 Використовуючи структурну схему задачі 1.1, знайти ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента, якщо вони однакові і якщо ймовірність безвідмовної роботи локомотива дорівнює 0,7.

1.3 Використовуючи структурну схему задачі 1.1, знайти ймовірність безвідмовної роботи останнього елемента схеми,

якщо ймовірності безвідмовної роботи перших чотирьох елементів однакові й дорівнюють 0,95, а ймовірність безвідмовної роботи локомотива дорівнює 0,7.

1.4 Знайти ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.1), якщо ймовірності безвідмовної роботи окремих елементів однакові і дорівнюють 0,9.

1.5 Знайти ймовірності безвідмовної роботи елементів, якщо вони однакові, а ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.1) дорівнює 0,7.

1.6 Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює 0,7. Ймовірності безвідмовної роботи кожного з перших п'яти елементів системи однакові й дорівнюють 0,9. Знайти ймовірності безвідмовної роботи інших елементів системи, якщо вони рівні між собою (рисунок 1.1).

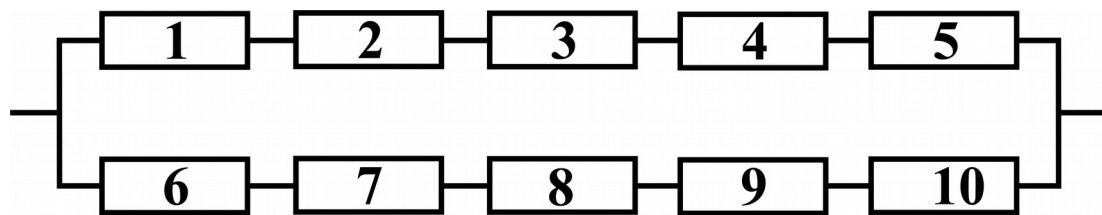


Рисунок 1.1 – Структурна схема, що містить послідовне й паралельне з'єднання елементів системи

1.7 Локомотивний дизель подано у вигляді системи із десяти паралельно увімкнених елементів (циліндрів). Знайти ймовірність безвідмовної роботи двигуна, якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дорівнює 0,8.

1.8 Ймовірність безвідмовної роботи двигуна 0,9. Використовуючи структурну схему задачі 1.7, знайти ймовірності безвідмовної роботи кожного з десяти однакових циліндрів.

1.9 Використовуючи умову задачі 1.7, визначити ймовірність безвідмовної роботи двигуна, маючи на увазі, що відмова більш ніж одного циліндра призводить до зупинки двигуна.

1.10 Ґрунтуючись на структурній схемі, знайти ймовірність безвідмовної роботи локомотива, якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дорівнює 0,9 (рисунок 1.2).

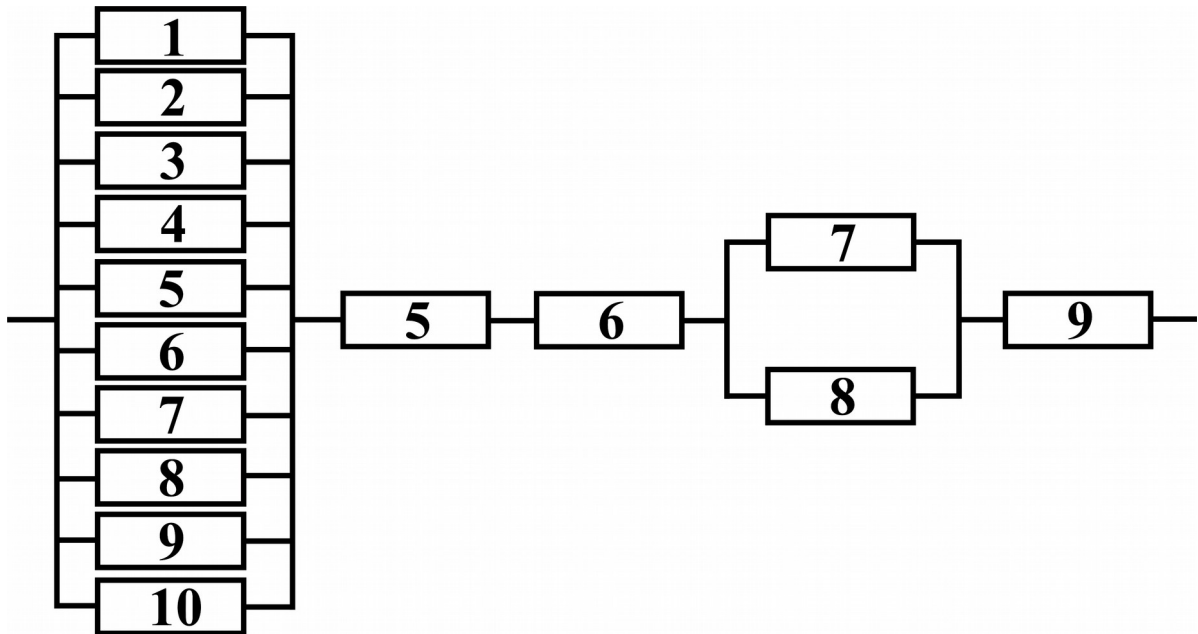


Рисунок 1.2 – Структурна схема локомотива

1.11 Ймовірність безвідмовної роботи локомотива дорівнює 0,7 (рисунок 1.2). Знайти ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента, якщо вони однакові.

1.12 Ймовірність безвідмовної роботи локомотива дорівнює 0,7 (рисунок 1.2). Ймовірності безвідмовної роботи послідовно увімкнених елементів однакові, а паралельно увімкнених елементів також однакові і на 20% менші ймовірності безвідмовної роботи послідовно увімкненого елемента. Знайти ймовірності безвідмовної роботи усіх елементів даної системи.

1.13 Ймовірність безвідмовної роботи кожного послідовно увімкненого елемента дорівнює 0,9, а кожного паралельно увімкненого елемента на 20% менше ймовірності безвідмовної роботи послідовно увімкнених елементів. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.2).

1.14 Ймовірність безвідмовної роботи локомотива дорівнює 0,7 (рисунок 1.2), а кожного з послідовно з'єднаних елементів

дорівнює 0,9. Визначити ймовірність безвідмовної роботи кожного з паралельно увімкнених елементів, якщо вони однакові.

1.15 Ймовірність безвідмовної роботи локомотива (рисунок 1.2) дорівнює 0,7, а кожного паралельно з'єданого елемента дорівнює 0,8. Знайти ймовірність безвідмовної роботи кожного з послідовно з'єднаних елементів, якщо вони однакові.

1.16 У яких межах може змінюватися ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.3) залежно від ємності накопичувача, якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дорівнює 0,95?

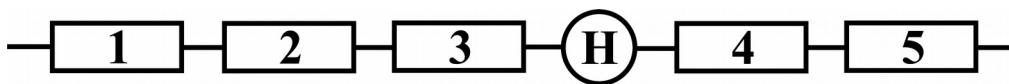


Рисунок 1.3 – Схема з накопичувачем

1.17 Як зміниться ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.3), якщо встановити накопичувач між четвертим і п'ятим елементами? Ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дорівнює 0,95.

1.18 Ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.4) з ненавантаженим резервом і цілком надійним перемиканням дорівнює 0,95. Визначити ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента, якщо вони однакові.

1.19 Використовуючи структурну схему задачі 1.18, визначити ймовірність безвідмовної роботи системи, якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дорівнює 0,9.

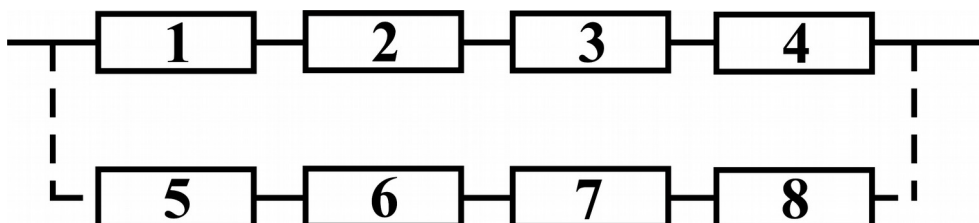


Рисунок 1.4 – Схема з ненавантаженим резервом і цілком надійним перемиканням

1.20 Використовуючи структурну схему задачі 1.18, визначити ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента основного кола (1 – 4), якщо вони однакові. Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює 0,94, а кожного елемента дублюючої системи (5 – 8) дорівнює 0,9.

1.21 Використовуючи структурну схему задачі 1.18, знайти ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента дублюючої системи (5 – 8), якщо вони однакові. Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює 0,94, а кожного елемента основної системи (1 – 4) дорівнює 0,9.

1.22 Знайти ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.5), що містить ненавантажений резерв (6, 7, 8). Ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента системи дорівнює 0,9.

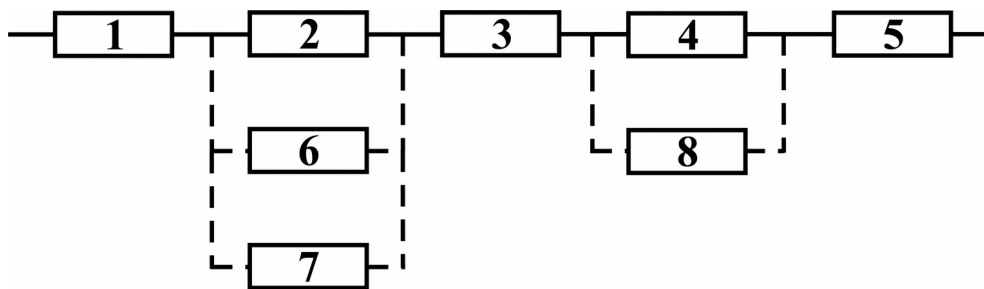


Рисунок 1.5 – Схема, що містить елементи, які дублюються заміщенням із цілком надійним перемиканням

1.23 Ймовірність безвідмовної роботи системи (рисунок 1.5) дорівнює 0,65, а першого, третього й п'ятого елементів однакова й дорівнює 0,9. Знайти ймовірності безвідмовної роботи інших елементів, якщо вони однакові.

1.24 Використовуючи структурну схему задачі 1.22, знайти ймовірності безвідмовної роботи першого, третього й п'ятого елементів, якщо вони однакові. Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює 0,65, а інших елементів однакова й дорівнює 0,9.

1.25 Використовуючи структурну схему задачі 1.22, визначити ймовірності безвідмовної роботи дублюючих елементів (6, 7, 8), якщо вони однакові. Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює 0,65, а кожного елемента основної системи (1 – 5) дорівнює 0,9.

2 ВИБІРКОВИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

2.1 Припустимий відсоток браку 5%. Практично неможливим будемо вважати таку подію, ймовірність якої менше 0,1. При якій кількості бракованих виробів у вибірці, що складається з 10 виробів, доцільно бракувати усю партію продукції?

2.2 Припустимий відсоток браку 10%. Практично неможливою будемо вважати подію, ймовірність якої менше 0,1. При якій кількості доброякісних виробів у вибірці, що містить 8 деталей, доцільно бракувати усю партію?

2.3 Партія продукції містить 5% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 20 деталей виявиться 5% бракованих виробів?

2.4 Партія містить 5% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 10 деталей виявиться 10% бракованих виробів?

2.5 Партія містить 5% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 7 виробів 2 деталі виявляться бракованими?

2.6 Партія містить 10% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 9 виробів 6 деталей виявляться доброякісними?

2.7 Партія містить 5% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 7 виробів не більш ніж 2 деталі виявляться бракованими?

2.8 Партія містить 10% бракованих виробів. Яка ймовірність, що у вибірці з 9 виробів не менш 6 деталей виявляться доброякісними?

2.9 Припустимий брак – 10%. Практично неможливою подією будемо вважати таку подію, ймовірність якої менше 0,1. Вибірка містить 8 виробів. До яких меж може збільшитися відсоток браку, перш ніж він буде виявлений?

3 СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

3.1 У результаті вимірювання діаметрів у 100 валів установлено, що розміри 5 валів знаходяться у межах 50 – 50,005 мм, 15 валів – у межах 50,005 – 50,010 мм, 25 валів – у межах 50,010 – 50,015 мм, 30 валів – у межах 50,015 – 50,020 мм, 15

валів – у межах 50,020 – 50,025 мм, 10 валів – у межах 50,025 – 50,030 мм. Побудувати гістограму розподілу ймовірностей і щільності ймовірностей розмірів валів.

3.2 Значення випадкової величини задані таблицею 3.1. Знайти частоти випадкових величин, середнє значення, дисперсію і середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 3.1

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	11	22	22	33	33	33	33	44	44	55

3.3. Побудувати графік функції математичного очікування напруг, що діють в реле. Значення напруг для різних реалізацій N у різні моменти часу наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

N	t										
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	53	57	55	59	60	45	30	67	75	33	40
2	60	46	44	63	57	48	47	49	57	42	40
3	45	51	71	55	21	46	74	40	58	46	56
4	76	58	30	28	62	72	48	58	41	65	41
5	82	34	40	43	50	66	79	29	3	54	72
6	52	55	42	50	65	83	18	48	41	41	68
7	60	46	51	50	52	70	57	10	31	52	62
8	67	30	34	65	33	50	26	61	80	22	43
9	83	35	58	24	58	46	82	40	44	41	57
10	65	25	82	67	62	50	32	65	44	22	85

3.4 Випадкова величина X задана диференційною функцією $f(x) = 2x$ в інтервалі (0,1), поза цим інтервалом $f(x) = 0$. Визначити математичне очікування величини X.

3.5 Визначити математичне очікування випадкової величини X, заданої інтегральною функцією

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ x/4 & \text{при } 0 \leq x \leq 4, \\ 1 & \text{при } x = 4. \end{cases}$$

3.6 Використовуючи дані задачі 3.3, побудувати графік функцій дисперсії й середнього квадратичного відхилення напруг, що діють у реле.

3.7 Використовуючи дані задачі 3.3, побудувати графік кореляційної функції напруг, що діють у реле.

3.8 Середнє значення вимірів 6,500, дисперсія 0,133. Практично неможливою подією будемо вважати таку подію, ймовірність якої менше 0,003. Чи є вимір 6,866 грубою помилкою?

3.9 Середнє значення вимірів 6,500, дисперсія 0,133. Практично неможливою подією вважаємо таку подію, ймовірність якої менше 0,1. Чи є вимір 6,866 грубою помилкою?

3.10 Середнє значення вимірів 6,500, дисперсія 0,133. При якому значенні ймовірності практично неможливої події вимір 6,866 є грубою помилкою?

3.11 Значення безрозмірного коефіцієнта опору ґрунту залежно від зміни температури задані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

t, °C	0	10	20	30	40	50	60
k	–	0,16	0,19	0,18	0,20	0,21	0,23

Прийнявши значення ймовірності практично неможливої події рівним 0,003, установити значущість впливу зміни температури на коефіцієнт опору ґрунту, якщо помилка відтворюваності дослідів становить 0,015.

3.12 Знайти коефіцієнт кореляції величин, заданих у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

x	23,0	24,0	24,5	24,5	25,0	25,5	26,0	26,0	26,0	26,5	26,5	27	27	28
y	0,48	0,50	0,49	0,50	0,51	0,52	0,49	0,51	0,53	0,50	0,52	0,54	0,52	0,53

3.13 Знайти коефіцієнт регресії величин, заданих у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

x	0	10	20	30	40	50	60	70	80
y	33,5	37,0	41,2	46,1	50,0	52,9	56,8	64,3	69,9

4 ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

4.1 Припустимий брак продукції становить 10%. Побудувати графік функції ймовірності появи бракованої продукції для вибірки, що складається з чотирьох деталей.

4.2 Досліджено 10 виробів. Кількість дефектів у кожному виробі наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	1	0	2	3	0	1	2	1	0	0

Виходячи з розподілу Пуассона, побудувати графік функції ймовірності появи дефектів продукції.

4.3 Побудувати графік функції розподілу ймовірностей суми при двократному киданні грального кубика.

4.4 Побудувати графіки функції розподілу ймовірностей і щільності ймовірностей за нормальним законом, якщо математичне очікування – 3, а середнє квадратичне відхилення – 1,2.

4.5 Тривалість безвідмовної роботи електроламп має показниковий розподіл $F(t) = 1 - e^{-0.01t}$ ($t > 0$). Визначити ймовірність того, що за час тривалістю $t = 50$ год: а) лампа перегоріла; б) лампа справна.

4.6 Випробовують два незалежно працюючих гідронасоси. Тривалість часу безвідмовної роботи першого гідронасоса має показниковий розподіл $F_1(t) = 1 - e^{-0.02t}$, другого $F_2(t) = 1 - e^{-0.05t}$. Визначити ймовірність того, що за час тривалістю $t = 6$ год: а) обидва гідронасоси відмовлять; б) обидва гідронасоси не відмовлять; в) тільки відмовить один гідронасос; г) хоча б один гідронасос відмовить.

4.7 Селективний вузол схеми збудження тепловоза складається з чотирьох блоків. Ймовірність виходу кожного блока з ладу за час t дорівнює 0,3. Побудувати функцію розподілу кількості відмов.

4.8 Побудувати графіки функцій розподілу ймовірностей і щільності ймовірностей Вейбулла

$$q = \frac{m}{n} x^{m-1} \exp\left(-\frac{x^m}{n}\right)$$

у випадку $m = 2$, $n = 3$.

4.9 Середнє значення межі міцності – 40000 Н/см², дисперсія – 1000000 Н²/см⁴. Яка ймовірність того, що межа міцності зразка виявиться величиною, меншою 30000 Н/см²?

4.10 Середнє значення експериментальних напружень 5000 Н/см², дисперсія – 4000000 Н²/см⁴. Яка ймовірність того факту, що напруження перевищать 10000 Н/см²?

4.11 Ймовірність появи бездефектної продукції становить 0,9. Грунтуючись на біноміальному законі розподілу побудувати графік функції ймовірності появи дефектної продукції у вибірці, що містить шість елементів.

4.12 Середнє значення діаметра вала – 50,02 мм. Дисперсія – 0,0001 мм². Яка ймовірність, що розміри вала не вийдуть за межі 50 – 50,03 мм?

4.13 Середнє значення напружень – 4000 Н/см². Середнє квадратичне відхилення – 500 Н/см². З якою ймовірністю можна стверджувати, що значення напруження не відхиляється від свого середнього значення більше ніж на 10%?

4.14 Середнє значення межі міцності 60000 Н/см². Дисперсія 250000 Н²/см⁴. Які розрахункові напруження можна допустити, якщо задатися ймовірністю практично неможливої події, що дорівнює – 0,001? Який запас міцності варто призначити?

4.15 Середнє значення межі міцності 5500 Н/см². При якій дисперсії механічних властивостей є допустимим запас міцності, що дорівнює 2, якщо вважати практично неможливою подією таку подію, ймовірність якої менше 0,001?

4.16 Середнє значення межі міцності – 62000 Н/см². Дисперсія 1000000 Н²/см⁴. Запас міцності – 3. Який відсоток відмов варто очікувати?

4.17 Припустимий відсоток відмов – 0,1%, запас міцності – 2,5. Яке повинне бути середнє значення межі міцності матеріалу при дисперсії 4000000 Н²/см⁴?

4.18 Жорсткість пружин ресорного підвішування вагона змінюється у межах 10%. Практично неможливою подією вважати таку подію, ймовірність якої менше 0,003. Яка ймовірність того, що жорсткості двох сидел, у яких встановлено по 8 пружин, також можуть відрізнятись в межах 10%?

4.19 Жорсткість пружин ресорного підвішування змінюється у межах 10%. Практично неможливою подією вважати таку подію, ймовірність якої менше 0,003. У яких межах можуть відрізнятись жорсткості двох сидел, що містять по 8 пружин?

4.20 Жорсткість пружин ресорного підвішування змінюється у межах 10%. Ймовірність практично неможливої події менше 0,003. З якою ймовірністю можна стверджувати, що жорсткості двох сидел, що містять по 8 пружин, будуть відрізнятись більш ніж на 5%?

5 ОЦІНКА ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБМЕЖЕНОЇ КІЛЬКОСТІ ВИПРОБУВАНЬ

5.1 У результаті вимірювань 100 валів встановлене середнє значення діаметра 50,02 мм, дисперсії – 0,0001 мм². З якою ймовірністю можна стверджувати, що середнє значення вала не відхилиться від знайденої величини більш ніж на 0,005%?

5.2 У результаті вимірювань 100 валів встановлене середнє значення діаметра 50,02 мм, дисперсії – 0,0001 мм². Які відхилення середнього значення від знайденої величини варто очікувати при довірчій імовірності 0,9?

5.3 Скільки треба провести дослідів, щоб можна було стверджувати з довірчою ймовірністю 0,95, що середнє значення діаметра 50,02 мм не відхилиться від зазначеного значення більш ніж на 0,5% при дисперсії 0,0001 мм²?

5.4 У результаті проведення 900 експериментів встановлена ймовірність появи доброякісної продукції 0,8. З якою ймовірністю можна стверджувати, що ймовірність появи доброякісної продукції не вийде за межі 0,72 – 0,88?

5.5 У результаті проведення 900 експериментів встановлена ймовірність появи доброякісної продукції 0,8. У яких межах можна чекати зміни зазначеного значення при довірчій ймовірності 0,95?

5.6 Скільки дослідів треба провести, щоб з довірчою ймовірністю 0,9 гарантувати ймовірність появи доброякісної продукції у межах 0,72 – 0,88?

5.7 При випробуванні 100 двигунів жоден з них не вийшов з ладу. Який відсоток браку можна очікувати при довірчій ймовірності 0,95?

5.8 Яку кількість дослідів треба провести, щоб з довірчою ймовірністю 0,9 можна було стверджувати, що брак не перевищить 1% при позитивному результаті (відсутності браку) всіх випробувань?

5.9 У результаті проведення 100 дослідів встановлені середні значення діаметра вала – 50,03 мм і дисперсії – 0,0001 мм². З якою ймовірністю можна стверджувати, що розміри вала не вийдуть за межі 50,01 – 50,04 мм?

5.10 У результаті проведення 100 дослідів встановлені середні значення діаметра вала – 50,03 мм і дисперсії – 0,0001 мм². З якою довірчою ймовірністю можна стверджувати, що середнє значення діаметра вала не перевищить 50,04 мм?

5.11 У результаті проведення 100 дослідів знайдене середнє значення діаметра вала – 50,03 мм. Дисперсія дорівнює 0,0001 мм². З якою довірчою ймовірністю можна стверджувати, що середнє значення діаметра вала не менше 50,01 мм?

5.12 Середнє значення діаметра вала – 50,03 мм. Дисперсія – 0,0001 мм². Скільки вимірів треба зробити, щоб з довірчою ймовірністю 0,9 можна було стверджувати, що середнє значення діаметра вала більше 50,01 мм?

5.13 Середнє значення діаметра вала 50,03 мм. Дисперсія – 0,0001 мм². Скільки вимірів треба провести, щоб з довірчою ймовірністю 0,9 можна було стверджувати, що середнє значення діаметра менше 50,04 мм?

6 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ РОЗСПЮВАННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ

6.1 При випробуванні ресор локомотива встановлене середнє значення напружень – 80 Н/мм^2 . Дані отримані під час випробування 100 ресор. При цьому виявлена дисперсія $400 \text{ Н}^2/\text{мм}^4$. Така ж дисперсія виявлена при механічних випробуваннях 100 зразків матеріалу ресор. Припустимий відсоток відмов – 1%. Який запас міцності слід призначити при довірчій ймовірності 0,95?

6.2 При випробуванні ресор локомотива встановлене середнє значення напружень – 80 Н/мм^2 . При цьому виявлена дисперсія $400 \text{ Н}^2/\text{мм}^4$. Така ж дисперсія виявлена при випробуваннях 100 зразків матеріалу ресор. Призначено запас міцності 2 з довірчою ймовірністю 0,95. Який відсоток відмов слід очікувати?

6.3 Розміри пресового спряження: $\varnothing 50^{0,030}$, $\varnothing 50_{0,045}^{0,060}$. Ймовірність практично неможливої події менше 0,001. Визначити розрахункові значення натягів.

6.4 Розміри пресового спряження: $\varnothing 50^{0,030}$, $\varnothing 50_{0,045}^{0,060}$. При якому значенні ймовірності практично неможливої події мінімальний розрахунковий натяг удвічі більше номінального значення мінімального натягу?

6.5 У яких межах змінюється можлива довжина пробігу локомотива, якщо середні значення напружень у зубчастій передачі тягового редуктора складають 9050 Н/см^2 , коефіцієнт кривої втоми – 3, середня кількість навантажень на 1 км пробігу – 19,4; коефіцієнт напруження – 0,8; параметр кривої втоми $3,15 \cdot 10^{12} \text{ Н}^3/\text{мм}^6$; варіація параметра кривої втоми – 0,15, варіація коефіцієнта напруження 0,1?

6.6 Який середній пробіг локомотива, якщо середні значення напружень у зубчастій передачі тягового редуктора складають 9050 Н/см^2 , коефіцієнт напружень – 0,8; параметр кривої втоми $3,15 \cdot 10^{12} \text{ Н}^3/\text{мм}^6$, середня кількість навантажень на 1 км пробігу – 19,4, коефіцієнт кривої втоми – 3?

6.7 Який середній рівень напруг у зубчастій передачі тягового редуктора локомотива, якщо середній пробіг становить 288000 км, кількість навантажень – 19,41 1/км, коефіцієнт напружень – 0,8; коефіцієнт кривої втоми – 3, параметр кривої втоми – $3,15 \cdot 10^{12} \text{ Н}^3/\text{мм}^6$?

7 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

7.1 Випробувань зазнали 500 однакових двигунів. Через 200 год роботи вийшли з ладу 30 двигунів. Визначити ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови двигуна.

7.2 Випробування зазнали 500 однакових двигунів. Через 150 год роботи відмовили 30 двигунів, а через 200 год роботи вийшли з ладу 34 двигуна. Визначити частоту й інтенсивність відмов у проміжку часу 150 – 200 год.

7.3 При випробуваннях партії (500 од.) двигунів отримані результати, наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

t, год	0	50	100	150	200	250	300
N, од	0	20	24	30	34	40	50

Дані таблиці вказують на залежність кількості двигунів, що вийшли з ладу, від тривалості випробувань. На основі отриманих даних необхідно побудувати графік функції інтенсивності відмов.

7.4 Використовуючи дані задачі 7.3, побудувати графіки функцій ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови двигунів.

7.5 Використовуючи дані задачі 7.3, побудувати графік функції частоти відмов.

7.6 Розглядаючи період нормальної експлуатації машини, який характеризується сталістю інтенсивності відмов, знайти середнє напрацювання на відмову, якщо інтенсивність відмов дорівнює 0,0001 1/год.

7.7 В умовах задачі 7.6 знайти інтенсивність відмов, якщо середнє напрацювання на відмову становить 20000 год.

7.8 Використовуючи дані задачі 7.7, знайти ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмов через 500 год роботи машини.

7.9 Використовуючи дані задачі 7.7, знайти частоту відмов через 500 год роботи машини.

7.10 Використовуючи дані задачі 7.7, побудувати графік функції частоти відмов в інтервалі часу 50 – 5000 год.

7.11 Використовуючи дані задачі 7.7, побудувати графіки функцій імовірності відмови машини в інтервалі 50 – 5000 год.

7.12 В умовах задачі 7.7 ймовірність безвідмовної роботи машини після 2000 год роботи становить 0,9. Визначити інтенсивність відмов.

7.13 В умовах задачі 7.7 ймовірність безвідмовної роботи після 2000 год роботи машини становить 0,9. Знайти частоту відмов.

7.14 В умовах задачі 7.7 ймовірність відмов після 2000 год роботи машини становить 0,1. Визначити інтенсивність відмов і середнє напрацювання на відмову.

7.15 В умовах задачі 7.7 ймовірність відмов після 2000 год роботи машини становить 0,8. Знайти частоту відмов.

7.16 В умовах задачі 7.7 ймовірність безвідмовної роботи машини становить 0,85 при інтенсивності відмов 0,0001 1/год. Визначити тривалість роботи машини.

7.17 Ймовірність безвідмовної роботи машини дорівнює 0,85 при інтенсивності відмов 0,0001 1/год. Знайти частоту відмов.

7.18 В умовах задачі 7.7 частота відмов становить $85 \cdot 10^{-6}$ 1/год при інтенсивності відмов 0,0001 1/год. Визначити тривалість роботи машини.

7.19 В умовах задачі 7.7 частота відмов після 2000 год роботи машини становить $9 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Визначити інтенсивність відмов і середнє напрацювання на відмову.

7.20 На випробування поставлено 44 паливних насоси високого тиску. За час $t=2000$ год відмовили $n=14$. За наступні $\Delta t_i = 100$ год відмовило $\Delta n_i = 3$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(2000)$, $P(2050)$, щільність розподілу $f(2050)$, інтенсивність відмов $\lambda(2050)$ паливних насосів високого тиску.

7.21 На випробовуваннях знаходились $N=1000$ сигнальних пультових електричних лампочок. Кількість відмов Δn_i фіксувалося через кожні 100 год роботи ($\Delta t=100$ год) згідно з даними, наведеними в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

$\Delta t_i, \text{год}$	0 – 100	100 – 200	200 – 300	300 – 400	400 – 500	500 – 600	600 – 700	700 – 800	800 – 900	900 – 1000
Δn_i	50	40	32	25	20	16	15	14	15	14

Визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(1000)$, інтенсивність відмов $\lambda(950)$ і середнє напрацювання до першої відмови $T_{\text{ср}}$.

7.22 Час безвідмовної роботи моторно-осьового підшипника підпорядковується закону Вейбулла з параметрами $b=1,5$, $\lambda_0=10^{-4}$ год⁻¹, тривалість роботи $t=100$ год. Визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, щільність розподілу $f(t)$, інтенсивність відмов $\lambda(t)$, середнє напрацювання на відмову $T_{\text{ср}}$.

7.23 Система паливоподачі складається з паливного насоса високого тиску і форсунки. Ймовірність безвідмовної роботи кожного з них протягом часу $t=100$ год становила $P_1(100)=0,95$, $P_2(100)=0,97$. Визначити середнє напрацювання до першої відмови системи при експоненційному законі розподілу $T_{\text{ср}}$.

7.24 Час роботи корінного підшипника колінчастого вала до відмови підпорядковується закону розподілу Релея. Обчислити кількісні характеристики надійності $P(t)$, $f(t)$ і $T_{\text{ср}}$ для $t=500$ год, якщо параметр розподілу $C=700$ год.

7.25 В результаті випробовування 35 паливних форсунок протягом $t=1000$ год визначили інтенсивність відмов $\lambda=10^{-4}$ год⁻¹. Закон розподілу відмов експоненційний. Час ремонту форсунки є випадковою величиною, який набуває значення $t_{p1}=3$ год з імовірністю $P_1=0,6$, значення $t_{p2}=3,2$ год з імовірністю $P_2=0,5$ і значення $t_{p3}=3,5$ год з імовірністю $P_3=0,4$. Визначити $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи, середнє напрацювання на відмову T_0 , середній час ремонту $T_{\text{гр}}$, коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$, коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{ог}}$.

7.26 На випробування встановлено реле управління ТРПУ, $N = 400$. За час $t = 3000$ год відмовило $n(t) = 200$ реле, за наступний інтервал часу $\Delta(t) = 100$ год відмовило $n(\Delta t) = 100$ реле. Визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(3000)$, $P(3100)$, $P(3050)$, щільність розподілу $f(3050)$, інтенсивність відмов $\lambda(3050)$.

7.27 Система складається з блоків схеми збудження тепловозів, причому відмова будь-якого блока призводить до відмови системи. Відомо, що перший блок відмовив 34 рази протягом 952 год роботи, другий – 24 рази протягом 960 год роботи, а інші блоки протягом 210 год роботи відмовили 4, 6 і 5 разів відповідно. Визначити напрацювання на відмову системи в цілому, якщо кожен з п'яти приладів підпорядковується експоненційному закону надійності.

7.28 Інтенсивність відмов електричних машин тепловоза $\lambda = 0,02$ год⁻¹, а середній час відновлення $t_b = 10$ год. Підрахувати коефіцієнт готовності електричної машини та її функцію $(K_r(t) = K_r + (1 - K_r)^{-t/K_r t_b})$.

8 ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

8.1 У мастило потрапила порція абразивних частинок, що складається з 10% крупних частинок, з 30% середніх і з 60% дрібних частинок. Ймовірність прискореного абразивного зношування робочих ділянок зубів шестерень складає 90, 30 і 10% для великих, середніх і дрібних частинок. Яка ймовірність прискореного абразивного зношування при даній порції абразиву?

8.2 У мастило потрапила порція абразивних частинок, що складається з 10% крупних частинок, з 30% середніх і з 60% дрібних частинок. Ймовірність прискореного зношування зубів шестерень від даної порції абразиву становить 24%. Якби порція абразиву складалася тільки з великих частинок, то ймовірність прискореного зношування становила б 90%, а якщо із середніх – 30%. Яка ймовірність прискореного зношування, яке викликається дрібними частинками?

8.3 У мастило потрапила порція абразивних частинок, що складається з великої, середньої і дрібної фракції. Кількість великих частинок складає 10%, середніх – 30%. Ймовірність прискореного абразивного зношування тільки великою фракцією – 90%, дрібною – 10%. Ймовірність прискореного абразивного зношування зубів шестерень від даної порції абразиву – 24%. Яка ймовірність прискореного зношування, викликаного середніми частинками?

8.4 У вибірці, яка містить 3 деталі, одна деталь виявилася бракованою. Яка ймовірність того факту, що дві деталі, що залишилися, є доброякісними?

8.5 У вибірці, яка містить 6 деталей, одна деталь виявилася бракованою. Яка ймовірність того факту, що вся вибірка виявиться бракованою?

8.6 У вибірці, яка містить 6 деталей, одна деталь виявилася бракованою. Яка ймовірність того факту, що половина вибірки виявиться бракованою?

8.7 Дані спостережень наведені в діагностичній таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

H_i	$p_{H_i}(A_1)$	$p_{H_i}(A_2)$	$p(H_i)$
H_1	0,2	0,3	0,05
H_2	0,4	0,5	0,15
H_3	0	0,05	0,80

H_1 – зношеність циліндро-поршневої групи;
 H_2 – закоксованість клапанів;
 H_3 – нормальний стан;
 A_1 – димний вихлоп дизеля;
 A_2 – сторонні шуми;
 P – ймовірність події

Встановити найбільш імовірну несправність локомотива.

8.8 Дані спостережень наведені в діагностичній таблиці 8.2.

Таблиця 8.2

H_i	$p_{H_i}(A_1)$	$p_{H_i}(A_2)$	$p(H_i)$
-------	----------------	----------------	----------

H_1	0,2	0,3	0,05
H_2	0,4	0,3	0,08
H_3	0,3	0,2	0,07
H_4	0	0,05	0,80

H_1 – зношеність циліндро-поршневої групи;
 H_2 – закоксованість клапанів;
 H_3 – прогоряння головки поршня;
 H_4 – нормальний стан;
 A_1 – димний вихлоп дизеля;
 A_2 – сторонні шуми;
 P – ймовірність події

Встановити найбільш імовірну несправність локомотива.

8.9 За статистичними даними депо отримані дані про роботу автоматичної системи контролю охолодження води дизеля 10Д100 за величиною температури води, отриманої за допомогою переносного пірметра для справного D_1 та несправного D_2 стану об'єкта.

Величина інтервалу температур визначає ознаку K_1 із трьома інтервалами, що наведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3

Д	Значення параметра t^0 , с			P(D_i)
	$t \leq 75$	$75 \leq t \leq 80$	$t > 80$	
D_1	62	28	10	82
D_2	0	28	72	18

Тобто 82% об'ємів були справними і 18% – несправними. Для діагнозу D_1 значення: $P(K_{j1}/D_1) = 0,62$, $P(K_{j2}/D_1) = 0,28$, $P(K_{j3}/D_1) = 0,1$, а для діагнозу D_2 : $P(K_{j1}/D_2) = 0$, $P(K_{j2}/D_2) = 0,28$, $P(K_{j3}/D_2) = 0,72$ ймовірності реалізації ознаки.

Визначити найбільше значення діагностичної ваги ознаки і зробити висновок щодо стану об'єкта.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

1.10 Локомотив (рисунок 1.2) може бути поданий за допомогою схеми десяти паралельно з'єднаних елементів (наприклад, циліндрів десятициліндрового двигуна), послідовно з якими з'єднується тягова передача. Послідовно з попередніми вмикаються два паралельних елементи, що відповідають двом різним допоміжним системам локомотива.

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи шуканої схеми скористаємося формулами для визначення ймовірності безвідмовної роботи паралельно й послідовно з'єднаних елементів [1]

$$\omega_{np} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \omega_k), \quad \omega_n = \prod_{k=1}^n \omega_k.$$

У даному прикладі ймовірності безвідмовної роботи елементів однакові, тому розрахунок ймовірності безвідмовної роботи паралельно з'єднаних елементів можна вести за формулою

$$\omega_{np} = 1 - (1 - \omega_k)^n.$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи локомотива

$$\omega_{1-4} = 1 - (1 - \omega_1)^4.$$

Ймовірність безвідмовної роботи систем гальмування

$$\omega_{7-8} = 1 - (1 - \omega_7)^2.$$

Ймовірність безвідмовної роботи локомотива

$$\omega = [1 - (1 - 0,9)^4] 0,9 \cdot 0,9 [1 - (1 - 0,9)^2] 0,9 = 0,72.$$

2.3 Для розв'язання слід скористатися біноміальним законом розподілу [2]. Довільний член біноміального ряду виражається формулою

$$p_{m,n} = C_n^m \omega^m u^{n-m}, \quad C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!},$$

де n – об'єм вибірки;
 m – номер члена ряду;
 u – частка бракованих виробів;
 ω – частка доброякісних виробів.

У цьому випадку

$$p_{m,n} = 20 \cdot 0,95^{18} \cdot 0,05 = 0,382.$$

3.2 Значення величин, що визначаються, можуть бути знайдені за відомими залежностями [3]

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i x_i, \quad D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i (x_i - x_{cp})^2, \quad \sigma = \sqrt{D},$$

де x_{cp} – середнє значення випадкової величини;
 n – кількість дослідів;
 m_i – кількість однакових значень випадкової величини;
 x_i – значення випадкової величини;
 D – дисперсія;
 σ – середнє квадратичне відхилення;

$$x_{cp} = \frac{11 + 2 \cdot 22 + 4 \cdot 33 + 2 \cdot 44 + 55}{10} = 33,$$

$$D = \frac{22^2 + 2 \cdot 11^2 + 4 \cdot 0^2 + 2 \cdot 11^2 + 22^2}{10} = 145,$$

$$\sigma = \sqrt{145} = 12,$$

де p_i – частота,

$$p_1 = \frac{1}{10}, \quad p_2 = \frac{2}{10}, \quad p_3 = \frac{4}{10}, \quad p_4 = \frac{2}{10}, \quad p_5 = \frac{1}{10}.$$

4.2 Розподіл Пуассона подано рядом [2]:

$$1 - e^{-a} + \frac{a}{1!} e^{-a} + \frac{a^2}{2!} e^{-a} + \dots + \frac{a^i}{i!} e^{-a} + \dots,$$

де a – середня кількість дефектів у вибірці.

У даному випадку $a = 1$. Розрахунки наведені в таблиці.

x	0	1	2	3	4
Формула	e^{-a}	ae^{-a}	$a^2 e^{-a} / 2!$	$a^3 e^{-a} / 3!$	$a^4 e^{-a} / 4!$
ω	0,370	0,370	0,185	0,060	0,015

Тут x – випадкова величина (кількість дефектів виробу),

ω – ймовірність його появи.

5.1 Розрахунок базується на відомому [4] виразі для оцінки параметра за результатами обмеженої кількості випробувань:

$$x_{cp} = x_{cp,n} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

де x_{cp} – середнє значення випадкової величини;

$x_{cp,n}$ – середнє значення випадкової величини, знайдене при даних випробуваннях;

n – кількість дослідів;

σ – середнє квадратичне відхилення;

t – коефіцієнт довірчої ймовірності.

У даному випадку

$$t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0,00005 x_{cp,n},$$

$$t = \frac{0,00005 \cdot 50,02}{0,01} \sqrt{100} = 2,5.$$

Припускаючи, що закон розподілу ймовірностей є нормальним, за таблицею [4] знайдемо довірчу ймовірність, рівну 99%.

7.1 Відповідно до методу Н. С. Стрелецького [5] ймовірність руйнування не повинна перевершувати частку полумок, яка допускається

$$u \leq [u].$$

Ймовірність руйнування може бути визначена за теоремою множення

$$u = \omega_1(x_1 > a)\omega_2(x_2 < a),$$

де x_1 – діюче напруження;

x_2 – межа міцності;

a – значення аргументу, при якому відбувається перетин кривих розподілу.

Закони розподілу передбачаються нормальними:

$$\omega_1(x_1 > a) = \frac{1}{2} - \Phi(z_1),$$

$$\omega_2(x_2 < a) = \frac{1}{2} + \Phi(z_2),$$

$$z_1 = \frac{a - x_{1cp} - t_1 \frac{\sigma_1}{\sqrt{n_1}}}{\sigma_1 \left(1 + \frac{t_1}{\sqrt{2n_1}}\right)},$$

$$z_2 = \frac{a - x_{2cp} - t_2 \frac{\sigma_2}{\sqrt{n_2}}}{\sigma_2 \left(1 + \frac{t_2}{\sqrt{2n_2}}\right)},$$

де Φ – функція Лапласа;

x_{1cp} – середнє значення випадкової величини;

σ_i – середнє квадратичне відхилення;

n_i – кількість дослідів;

t_i – коефіцієнт довірчої ймовірності.

У випадку $t_1 = t_2 = t$, $n_1 = n_2 = n$, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ зазначена умова зводиться до залежності

$$k \geq 1 + 2 \frac{\sigma}{x_{1cp}} \left[\frac{t}{\sqrt{n}} + z^* \left(1 + \frac{t}{\sqrt{2n}} \right) \right],$$

де k – запас міцності;
 (z^*) – корінь рівняння;

$$\Phi(z^*) = \frac{1}{2} - \sqrt{[u]}.$$

У даному випадку

$$\Phi(z^*) = \frac{1}{2} - \sqrt{0,01} = 0,4.$$

За таблицями [10] $z^* = 1,28$.

$$k \geq 1 + \frac{2}{8} \left[\frac{1,96}{\sqrt{100}} + 1,28 \left(1 + \frac{1,96}{\sqrt{2 \cdot 100}} \right) \right] = 1,83.$$

7.12 Вважаємо, що розглядається період нормальної експлуатації локомотива, коли інтенсивність відмов можна прийняти за величину, що не змінюється [7, 9],

$$\omega = e^{-\lambda t},$$

де ω – імовірність безвідмовної роботи;

λ – інтенсивність відмов;

t – час,

$$\lambda = -\frac{\ln \omega}{t},$$

$$\lambda = -\frac{\ln 0,9}{2000} = 0,775 \cdot 10^{-4} \text{ 1/Год.}$$

8.7 Розрахунок проводиться за узагальненою формулою Байєса [4, 8]

$$p_A(H_i) = \frac{p(H_i) \prod_{j=1}^m p_{H_i}(A_j)}{\sum_{i=1}^n p(H_i) \prod_{j=1}^m p_{H_i}(A_j)},$$

де $p_A(H_i)$ – ймовірність стану H_i , який визначається комплексом ознак A_j ;

$p(H_i)$ – ймовірність стану H_i ;

$p_{H_i}(A_j)$ – ймовірність існування ознаки A_j у стані H_i ,

$$p_A(H_1) = \frac{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = 0,090,$$

$$p_A(H_2) = \frac{0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = 0,910,$$

$$p_A(H_3) = \frac{0,8 \cdot 0 \cdot 0,05}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = 0.$$

Таким чином, найбільш імовірною несправністю є зношення циліндро-поршневої групи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Биргер И.А. Прочность. Устойчивость. Колебания. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 1.
- 2 Калабро С.Р. Принципы и практические вопросы надежности. – М.: Машиностроение, 1966.
- 3 Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971.
- 4 Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966.
- 5 Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968.
- 6 Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968.
- 7 Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. – М.: Высш. шк., 1974.
- 8 Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 511 с.

- 9 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1962. – 654 с.
- 10 Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Сов. радио, 1962. – 304 с.
- 11 Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: Сов. радио, 1966. – 168 с.
- 12 Розенберг В.Я., Прохоров А.И. Что такое теория массового обслуживания. – М.: Сов. радио, 1965. – 256 с.