Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять

з дисципліни «Надійність приладів»
для студентів спеціальності 015.13 Професійна освіта
(Метрологія, стандартизація та сертифікація)

Затверджено

методичною радою університету

протокол № від 2019 р.

Харків 2019

ЗМІСТ

У даних методичних указівках відбито зміст і послідовність проведення практичних занять, що дозволяють закріпити теоретичні знання, одержані під час вивчення курсу лекцій «Надійність приладів» за такими розділами: основні положення та залежності надійності; методи оцінки надійності складних систем; методи оцінки надійності деталей машин за основними критеріями; методи випробувань на надійність; особливості оцінки надійності автотракторної техніки.

В результаті вивчення курсу та проходження практичних занять студент повинний:

- знати основні терміни, поняття та визначення в області надійності машини;
- вміти виконувати оцінку надійності машин;
- планувати проведення випробувань на надійність;
- визначати потребу в запасних частинах і т. ін.

Практичне заняття 1

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

Мета роботи – визначення показників надійності об’’єктів.

1. Короткі теоретичні відомості

1.1. Ймовірність безвідмовної роботи P(t)

Ймовірність безвідмовної роботи - це ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникне. Ймовірність безвідмовної роботи оцінюється відносною кількістю дієздатних елементів і визначається формулою

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N - n(t)}{N}, \qquad (1.1)$$

де N - загальна кількість машин, для яких велися спостереження;

$n(t)$ - кількість машин, що відмовили за час напрацювання t.

1.2. Інтенсивність відмов λ(t)

Інтенсивність відмов - умовна щільність виникнення відмови об'єкта, зумовлена тим, що до розглянутого моменту часу відмова не виникла

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\left(N - \frac{\Delta n}{2}\right) \cdot \Delta t}, \qquad (1.2)$$

де Δn - число виробів, що відмовили за час t.

1.3 Середнє напрацювання на відмову T_0

Середнє напрацюванняна відмову - відношення сумарного напрацювання об'єкта, що відновлюється, до математичного сподівання числа його відмов протягом цього напрацювання. Цей показник використовують для оцінки надійності об'єктів, що відновлюються та під час експлуатації яких допускаються багаторазово повторювані відмови. Статистичну оцінку середнього напрацювання на відмову виконують за формулою

$$T_O = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{n}, \tag{1.3}$$

де $\sum_{i=1}^{N} t_i \rightarrow$ - сумарне напрацювання об'єкта;

n - сумарна кількість відмов.

1.4 Коефіцієнт готовності $K_Г$

Коефіцієнт готовності - ймовірність того, що об'єкт виявиться в дієздатному стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається

$$K_Г = \frac{T_O}{T_O + T_B}, \tag{1.4}$$

де T_B - середній час відновлення.

1.5 Коефіцієнт технічного використання. $K_{ТВ}$

Коефіцієнт технічного використання - відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в дієздатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в недієздатному стані і простоїв, зумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період

$$K_{TB} = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{\sum_{i=1}^{N} t_i + \sum_{i=1}^{N} t_{Рем_i} + \sum_{i=1}^{N} t_{Обс_i}}, \tag{1.5}$$

де t_i - математичне сподівання напрацювання об'єктів, що знаходяться в дієздатному стані;

$t_{ремі}$ - математичне сподівання часу простоїв, обумовлених ремонтом;

$t_{обсі}$ - математичне сподівання часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням.

2 Приклади та порядок виконання

<u>Приклад 1.</u> У процесі експлуатації 1000 двигунів ЗІЛ-130 враховувалась кількість ременів вентилятора, що виходили із ладу протягом кожної тисячі годин їхньої роботи. Одержані дані наведені в табл.1 Визначити ймовірність безвідмовної роботи ремнів вентилятора протягом 5000 і 8000 годин.

Порядок виконання

1. Визначимо сумарну кількість відмов об’єктів протягом певного проміжку часу.

2. Використовуючи формулу (1.1), знаходимо ймовірність безвідмовної роботи об”єкта.

Підставивши дані табл.1 у формулу, одержимо

$$P(t) = P(5000) = \frac{1000 - (20 + 25 + 35 + 50 + 30)}{1000} = 0{,}84;$$

$$P(t)=P(8000)=\frac{1000-(20+25+35+50+30+40+40)}{1000}=0.71.$$

Таблиця 1.1 - Дані про відмови ремнів вентилятора двигунів ЗІЛ-130

Інтервал t_i, год.	Число відмов n_i	Інтервал t_i, год.	Число відмов n_i
1	2	3	4
0-1000	20	13000-14000	40
1000-2000	25	14000-15000	50
2000-3000	35	15000-16000	40
3000-4000	50	16000-17000	50
1	2	3	4
4000-5000	30	17000-18000	40
5000-6000	50	18000-19000	50
6000-7000	40	19000-20000	35
7000-8000	40	20000-21000	35
8000-9000	50	21000-22000	50
9000-10000	40	22000-23000	25
10000-11000	40	23000-24000	30
11000-12000	50	24000-25000	20
12000-13000	30	25000-26000	35

Приклад 2. Використовуючи дані табл.1, визначити інтенсивність відмов ременів вентилятора, встановлених на двигунах ЗІЛ-130 за час роботи 500, 1500 годин.

Порядок виконання

1. Визначимо кількість відмов об’єкта всередині кожного проміжку часу роботи.

2. Використовуючи формулу (1.1), знаходимо інтенсивність відмов об’’єкта.

Підставивши дані у формулу, одержимо

$$\lambda(500) = \frac{20}{(1000-10)\cdot 1000} = 0{,}202\cdot 10^{-4};$$

$$\lambda(1500) = \frac{25}{(1000-32)\cdot 1000} = 0{,}258\cdot 10^{-4}.$$

<u>Приклад 3.</u> За період спостереження за трактором Т-150К зареєстровано 10 відмов. До початку спостережень трактор відпрацював 300 год., до кінця випробувань - 2500 год. Визначити середнє напрацювання на відмову.

Порядок виконання

1. Визначаємо напрацюваннятрактора за період, що спостерігається.
2. Визначаємо середнє напрацювання на відмову за формулою (1.2).

Підставивши дані у формулу, одержимо

$$t = t_1 - t_2 = 2500 - 300 = 2200 \text{ год},$$

$$T_O = 2200/10 = 220 \text{ год.}$$

<u>Приклад 4.</u> За період спостереження за роботою трьох тракторів Т-150К зареєстровано: в першого - 5 відмов, у другого - 10, у третього - 8. Напрацювання

першого трактора склав 1000 год., другого - 2500 год. і у третього - 1200 год. Визначити напрацювання тракторів на відмову.

Порядок виконання

1 Визначаємо середнє напрацювання об'єктів.

2 Підрахуємо сумарну кількість відмов об'єктів.

3 Визначаємо середнє напрацювання об'єкта на відмову.

Підставивши дані у формулу (3), одержимо

$$\sum_{i=1}^{N} t_i = 1000+2500+1200=4700 \text{ год.};$$

$$n = \sum_{i=1}^{n=3} =5+8+10=23;$$

$$T_O = 4700/23=204{,}35 \text{ год.}$$

Приклад 5. Середнє напрацювання на відмову машини T_0 = 350 год. і середній час відновлення T_B = 25 год. Визначити коефіцієнт готовності.

Порядок виконання

1 Визначаємо коефіцієнт готовності об'єкта за формулою (1.4).

Підставляючи вихідні дані, визначаємо коефіцієнт готовності об'єкта

$$K_Г = \frac{T_O}{T_O + T_B} = \frac{350}{350+25} = 0{,}933.$$

Приклад 6. Під час експлуатації 10 тракторів Т-150К одержано наступні статистичні дані: t = 850 год., $t_{рем}$ = 43 год., $t_{обс}$ = 27 год.. Визначити коефіцієнт технічного використання тракторів Т-150К.

Порядок виконання

1 Коефіцієнт технічного використання об’єктів визначимо за формулою (1.5).

Підставляючи вихідні дані у формулу, одержимо коефіцієнт технічного використання об’єктів

$$K_{TB} = \frac{850}{850 + 43 + 27} = 0,924.$$

3. Запитання для самоконтролю

1. Властивості надійності.
2. Визначення і залежності показників надійності.
3. Комплексні показники надійності.

Практичне заняття 2

ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ

Мета роботи – визначення ймовірності безвідмовної роботи об’’єктів за статистичними даними.

1. Короткі теоретичні відомості

Так як імовірність безвідмовної роботи *P(t)* та імовірність відмови *Q(t)* взаємно протилежні події, то сума їхніх імовірностей дорівнює одиниці, тобто

$$P(t) + Q(t) = 1. \tag{2.1}$$

Тоді

$$P(t) = 1 - Q(t). \tag{2.2}$$

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи двигуна використовуємо формулу

$$P(t) = \left(N_0 - n_{cp} \cdot {}^{t}\!/_{\Delta t}\right) / N_0 , \tag{2.3}$$

де N_0 - кількість виробів на початку випробувань;

n_{cp} - середня кількість виробів, що вийшли із ладу за час Δt;

t - час, за який визначається ймовірність безвідмовної роботи;

Δt - періодичність спостережень.

До числа найважливіших загальних залежностей надійності відносяться залежності надійності систем від надійності елементів. Найпростіша розрахункова модель системи – це послідовне з'єднання елементів.

Імовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку імовірностей безвідмовної роботи окремих елементів, тобто

$$P(t)=P1(t)\ P2(t)\ ...\ Pn(t)/ \qquad (2.4)$$

2. Приклади та порядок виконання

<u>Приклад 1.</u> Визначити ймовірність безвідмовної роботи двигуна СМД-60, якщо відомо, що за час роботи t = 2500 год. імовірність відмов склала 0,27.

Порядок виконання

1. Ймовірність безвідмовної роботи визначається формулою (2.2)

$$P(t)=1-0,27=0,73.$$

<u>Приклад 2</u>**.** Визначити ймовірність безвідмовної роботи об'єкта, що складається з 511 деталей, якщо встановлено, що за період експлуатації t вийшло з ладу 93 деталі.

Порядок виконання

1. Ймовірність безвідмовної роботи визначається формулою (2.1) (див. завдання 1)

$$P(t)=1-\frac{93}{511}=0,818.$$

<u>Приклад 3.</u> Визначити ймовірність безвідмовної роботи двигуна ЯМЗ-236 за наступних умов. Проведенню випробувань було піддано 150 двигунів. Час випробувань склав 3000 год. Встановлено, що за кожні 500 год. виходило з ладу три двигуни.

Порядок виконання

1 Ймовірність безвідмовної роботи визначається формулою (2.3)

$$P(t)=\left(150-3\cdot\frac{3000}{500}\right)/150=0,88.$$

Приклад 4. .На підставі вибірки, одержаної з 30 випадкових розмірів наробітків до відмови, визначити ймовірність безвідмовної роботи коробки переміни передач. Дані напрацювання до відмови приведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Дані напрацювання до відмови

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ti	29100	24500	21200	20500	18800	17400	16900	16000	15700	15250
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ti	14300	13800	13500	13210	12900	12640	12300	12080	11850	11630
№	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ti	11490	11140	10830	10520	10150	9870	9100	8340	7550	6220

Порядок виконання

1. Визначаємо мінімальне значення напрацювання до відмови.

За даними табл. 1 t_{min}=*6220 год.*

2. Визначаємо максимальне значення напрацювання до відмови.

За даними табл. 1 t_{min}=*29100 год.*

3. Визначаємо розмах

4. Визначаємо кількість інтервалів та ширину інтервалу за формулою ().

5. Визначаємо частоти в інтервалі функції розподілу та ймовірність безвідмовної роботи.

Результати розрахунку приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати розрахунку

№ інтервалу	Межа інтервалу *ti*	Середина інтервалу *tc*	Частота в інтервалі	Частота в інтервалі	Емпірична функція розподілу	Емпірична імовірність безвідмовної роботи *Pi=1-Fi*
1	6000-10000	8000	5	0,167	0,167	0,833
2	10000-14000	12000	14	0,467	0,634	0,366
3	14000-18000	16000	6	0,200	0,834	0,166
4	18000-22000	20000	3	0,100	0,934	0,066
5	22000-26000	24000	1	0,033	0,967	0,033
6	26000-30000	28000	1	0,033	1,000	0

Приклад 5. Система складається з двох агрегатів. Імовірності безвідмовної роботи кожного з них протягом часу t = 100 год. становлять P_1 (100) = 0,95, P_2(100) = 0,97. Знайти імовірність безвідмовної роботи системи.

Порядок виконання

1. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи за формулою (2.4)

$$P_c(100) = P_1(100) \cdot P_2(100) = 0{,}95 \cdot 0{,}97 = 0{,}92 .$$

3. Питання для самоконтролю

1. Вірогідний характер показника безвідмовної роботи об'єкта.
2. Основні залежності ймовірності безвідмовної роботи об'єкта.
3. Імовірність безвідмовної роботи системи.

Практичне заняття 3

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ У ПЕРІОДИ НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПОСТУПОВИХ ВІДМОВ

Мета роботи – визначення показників надійності за відомими законами розподілу.

Короткі теоретичні відомості

Широко застосовують для практичних розрахунків нормальний розподіл і розподіл Вейбулла – Гнеденко.

Закону нормального розподілу підлеглі напрацювання до відмови багатьох відновлюваних і невідновлюваних виробів, розміри та помилки вимірювань деталей і т.д.

Формула щільності розподілу має вигляд

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S^2}}. \tag{3.1}$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \int_1^{\infty} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S^2}} dt. \tag{3.2}$$

Імовірність відмови

$$Q(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S^2}} dt. \tag{3.3}$$

Інтенсивність відмови

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \tag{3.4}$$

Розподіл має два незалежних параметри: математичне сподівання - m_t і середнє квадратичне відхилення - s. Значення параметрів оцінюють за результатами випробувань за формулами

$$m(t) \approx \bar{t} = \frac{\sum t_i}{N}, \tag{3.5}$$

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum\left(t_i - \bar{t}\right)^2}, \tag{3.6}$$

де $\bar{t}$ і s – оцінки математичного сподівання та середнього квадратического відхилення.

<u>Розподіл Вейбулла.</u> Цей розподіл описує напрацювання деталей від утомленості руйнуваннях, напрацювання до відмов підшипників. Використовується для оцінки надійності деталей і вузлів машин, зокрема, автомобілів, підйомно-транспортних та інших машин. Застосовують також для оцінки надійності по напрацьованих відмовах. Надійність системи з послідовно з'єднаних однакових елементів, що підпорядковуються розподілу Вейбулла, також підпорядковуються розподілу Вейбулла.

Щільність розподілу

$$f(t) = \frac{b}{a}\left(t / a^{b-1}\right)\exp\left[-\left(t / a^{b}\right)\right]. \tag{3.7}$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \exp\cdot\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right]. \tag{3.8}$$

Імовірність відмови

$$Q(t) = 1 - P(t). \tag{3.9}$$

2. Приклади та порядок виконання

Приклад 1. Напрацювання шліців вала коробки переміни передач підпорядковується закону нормального розподілу, відомі його параметри: *σ = 1500 год., t = 6000 год*. Визначити кількісні характеристики $f(t)$, *P(t), F(t),* $\lambda(t)$ для *t = 2500 год*.

Порядок виконання

1. Відповідно до формули (1)

$$f(t)=\frac{1}{1500\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\cdot\left[-(2500-6000)^2/2\cdot 1500^2\right]=0{,}17\cdot 10^{-4}.$$

2. Функція розподілу визначається формулою (3.3)

$$F(t)\quad = F_0\left(\frac{2500-6000}{1500}\right)=F_0(-2{,}33).$$

3. За даними табл. А.1 визнзнайдемо

F0(2,33) = 0,99.

Остаточно одержимо

F(t) = 1 - F0(2,33) = 1- 0,99 = 0,01.

Тоді

P(2500) = 1 - F(2500) = 0,99;

$$\lambda(2500)=\frac{f(t)}{P(t)}=\frac{0{,}17\cdot 10^{-4}}{0{,}99}=0{,}1717\cdot 10^{-4}.$$

Приклад 2. Визначити кількісні характеристики надійності тракторів типу Т-150 для t = 2000 год. при σ = 1095 год., v = 0,365.

Порядок виконання

1. За даними табл. А.2 при *v=0,365* визначимо *b=3; C = 0,326.*

2. Із формули σ = $a\ C_в$ знаходимо параметр

$$a = \frac{\sigma}{C_b} = \frac{1095}{0{,}326} = 3359 .$$

3. За формулою (3.5)

$f(2000) = \exp\left[-\left(2000/3359^{3}\right)\right] \cdot 3/3359 \cdot \left(2000/3359\right)^{3-1} = 2{,}59 \cdot 10^{-4}$;

$P(2000) = \exp\left[-\left(2000/3359\right)^{3}\right] = 0{,}82$;

$\lambda(2000) = \dfrac{f(t)}{P(t)} = \dfrac{2{,}59 \cdot 10^{-4}}{0{,}82} = 3{,}16 \cdot 10^{-4}$.

Приклад 3. Час роботи вузла трактора Т-150К розподілено за експоненціальним законом при $\lambda = 3{,}1 \cdot 10^{-4}$ *год*$^{-1}$.

Установити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, частоту відмов $f(t)$ для t = *800, 1200, 2400 год*. і середнє напрацювання до першої відмови $t_{ср}$.

Порядок виконання

1. Відповідно до рівняння (3.5) імовірність безвідмовної роботи вузла

$$P(800) = \exp\cdot\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 800\right) = 0{,}7803,$$

$$P(1200) = \exp\cdot\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 1200\right) = 0{,}6893,$$

$$P(2400) = \exp\cdot\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 2400\right) = 0{,}4752.$$

2. Частота відмов визначається за рівнянням (3.7)

$$f(t) = 3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-3{,}1 \cdot 10^{-4}} \cdot t .$$

Тоді

$$f(800) = 3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 800\right) = 2{,}41 \cdot 10^{-4},$$

$$f(1200) = 3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 1200\right) = 2{,}13 \cdot 10^{-4},$$

$$f(2400) = 3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 2400\right) = 1{,}47 \cdot 10^{-4}.$$

3. Середнє напрацювання до першої відмови визначаємо за рівнянням (3.8)

$$t_{ср} = \frac{1}{3{,}1 \cdot 10^{-4}} = 3225{,}806 \text{ год}.$$

Приклад 4. Система складається з двох агрегатів. Імовірності безвідмовної роботи кожного з них протягом часу $t = 100$ *год*. становлять $P_1\ (100) = 0{,}95,\ P_2\ (100) = 0{,}97$. Діє експоненціальний закон розподілу. Знайти середнє напрацювання до першої відмови системи. $(\bar{t}_{cp\cdot c})$.

Порядок виконання

1. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(100) = P_1(100) \cdot P_2(100) = 0{,}95 \cdot 0{,}97 = 0{,}92\,.$$

2. Для експоненціального закону розподілу

$$P_c(100) = 0{,}92 = e^{-\lambda_c \cdot t} = e^{-\lambda_c \cdot 100}\,,$$

звідки $\lambda_c = 0{,}83 \cdot 10^{-3}\,\textit{год}^{-1}$.

3. Середнє напрацювання до першої відмови системи

$$\bar{t}_{cp\cdot c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0{,}83 \cdot 10^{-3}} = 1200\,\textit{год}.$$

Приклад 5. Час роботи вакуумного приладу підпорядковується закону розподілу Релея. Знайти кількісні характеристики надійності $P(t), f(t), \lambda(t), t_{cp}$ при $t = 500$ *год*., якщо параметр розподілу $\sigma = 1000$ *год.*

Приклад виконання

1. Скориставшись формулами (3.5) – (3.8), одержимо

$$P(500) = \exp\left(-500^2 / 2 \cdot 1000^2\right) = \exp(-0{,}125) = 0{,}88\,;$$

$$\lambda(500) = \frac{500}{1000^2} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\,;$$

$$t_{cp} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot 1000 = 1253 год.$$

Приклад 6. На дефектаційній ділянці спеціалізованого авторемонтного підприємства робили вимірювання поверхонь 100 шліцевих валів у п'ятьох позиціях:

- знос шийки під підшипник 25 шт.;
- знос шліців 35 шт.;
- знос циліндричної поверхні 25 шт.;
- знос шліців 60 шт.;
- знос різьби 55 шт.

Всього: 200 шт.

Визначити ймовірність появи кожного із дефектів одного вала.

Порядок виконання

1. Введемо позначення $N = 100$ валів, $\sum = 200$ - кількість усіх дефектів на валах, m - число дефектів на одному валу.

2. Параметр закону Пуассона для даного прикладу $a = \frac{\sum}{N} = \frac{200}{100} = 2$.

3. Імовірність появи кожного із дефектів одного вала відповідно складе

$$P(m = 0) = e^{-a} \cong 0{,}14,$$

$$P(m = 1) = a \cdot e^{-a} \cong 0{,}27,$$

$$P(m = 2) = e^{-a} \cdot \frac{a^2}{2!} \cong 0{,}27,$$

$$P(m = 3) = e^{-a} \cdot \frac{a^3}{3!} \cong 0{,}18,$$

$$P(m = 4) = e^{-a} \cdot \frac{a^4}{4!} \cong 0{,}10,$$

$$P(m = 5) = e^{-a} \cdot \frac{a^5}{5!} \cong 0{,}04.$$

3. Запитання для самоконтролю

1. Властивості закону нормального розподілу.
2. Параметри закону нормального розподілу.
3. Основні залежності закону Вейбулла – Гнеденко.
4. Особливості визначення надійності в періоди нормальної експлуатації машин і поступових відмов.

Практичне заняття 4

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ, ЩО ВІДНОВЛЮЮТЬСЯ

Мета роботи – обчислення параметрів, підбор теоретичних функцій емпіричного розподілу (вирівнювання емпіричного розподілу).

1. Короткі теоретичні відомості

Розрізняють емпіричні криві розподілу, одержані за результатами проведених дослідів і вибрані теоретично, які найбільше близько описують даний емпіричний матеріал.

Випадкові величини, що характеризують центр групування по числовій осі: математичне сподівання, мода та медіана.

Випадкові величини, що характеризують їхнє розсіювання: дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації.

Математичне сподівання (m_t) – сума добутків усіх можливих значень випадкової величини на ймовірність цих значень. На практиці часто використовують формулу

$$m(t) \approx \bar{t} = \frac{\sum t_i}{N} \quad , \qquad (4.1)$$

де t – поточне значення випадкової величини;

N – кількість машин, що спостерігаються.

Медіана – випадкова величина, що характеризує розташування центра групування і поділяє площу під графіком функції щільності навпіл.

Мода – випадкова величина, при якій щільність імовірності максимальна.

Дисперсія – математичне сподівання квадрата відхилення цієї величини від її математичного сподівання.

Середнє квадратичне відхилення являє собою корінь квадратний з дисперсії. Для оцінки розсіювання випадкової величини використовують таку формулу середнього квадратичного відхилення:

$$S \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum\left(t_i - \bar{t}\right)^2} \qquad (4.2)$$

Коефіцієнт варіації – відношення середнього квадратичного відхилення до математичного сподівання випадкової величини

$$V = \frac{S}{\bar{t}}\,. \qquad (4.3)$$

Експоненціальний закон розподілу визначають у формули

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - e^{-\lambda t}\,. \qquad (4.4)$$

Функція щільності розподілу має вигляд

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}\,. \qquad (4.5)$$

Математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення випадкової величини рівні

$$S = 1/\lambda. \qquad (4.6)$$

1.1. Вирівнювання за экспоненціальним законом

Функція експоненціального закону

$$f(t) = \lambda e^{\lambda \cdot t}\,.$$

Визначаємо середні значення

$$\bar{t} = \frac{\sum m_i t_i}{\sum m_i}\,.$$

1.2. Вирівнювання за законом Вейбулла

Функція щільності ймовірності закону Вейбулла

$$f(t) = b \cdot \lambda \cdot t^{b-1} \cdot \exp\cdot\left(-\lambda \cdot t^b\right),$$

де b, λ - параметри розподілу.

Тоді

$$f(t) = \left(\frac{k_b}{t}\right)^b \cdot b \cdot t^{b-1} \exp\cdot\left(-\frac{k_b t}{\bar{t}}\right)^b.$$

Побудова функції щільності здійснюється в такій послідовності.

За дослідними даними обчислюємо x і s за формулами

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n};$$

$$s_t = \sqrt{\frac{\sum t_i^2}{n} - \bar{t}^2}.$$

Визначаємо коефіцієнт варіації

$$V_t = \frac{s_t}{t}.$$

За таблицею додатка А.2 для обчисленого *Vt* знаходимо значення *b і kb.*

Обчислюємо параметр $a = \frac{\bar{t}}{k_b}$.

Для знайдених розмірів b, $\bar{a}$ за таблицею додатка А.4 знаходимо значення *af(t)* для кожного із значень $\frac{t}{a}$.

2. Приклади та порядок виконання

Приклад 1. За даними випробувань тракторів типу Т-150 за гарантійний період визначити середнє значення, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації напрацювань до відмови.

Дані напрацювань до відмови: 486, 70, 120, 152, 120, 160, 110, 108, 480, 138, 78, 240, 164, 384, 200, 7, 31, 432, 105, 201, 165, 800, 240, 510, 98, 230, 514, 65, 80, 218, 280, 41, 192, 803, 495, 230, 5, 3, 92, 128, 270, 427, 498, 350, 80, 4, 192, 2, 4, 345, 83 годин.

Порядок виконання

1. З одержаних результатів спостережень формуємо інтервальний статистичний ряд і заносимо до табл. 4.1.

2. Кількість інтервалів *n* ряду напрацювань визначаємо за формулою

$$n = \sqrt{N},$$

де *N* - кількість значень напрацювань до відмови, *N=51;*

$$n = \sqrt{N} = \sqrt{51} = 7{,}14.$$

3. Розмір інтервалу $A = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n} = \frac{800 - 2}{7,14} = 112$.

4. Для розрахунку приймаємо розмір інтервалу *A = 100*. Визначаємо середнє напрацювання на відмову $\bar{t}$ і середнє квадратичне відхилення σ, для чого з наявної інформації складемо табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Статистичний ряд інформації та напрацювання на відмову тракторів

Інтервал А,	Число відмов mi	Дослідна ймовірність Pi	$\sum$Pi	Середина інтервалу tic	mitic	t2ic	t2icmi
0... 100	16	0,314	0,314	50	800	2500	40000
100... 200	14	0,284	0,598	150	2100	22500	315000
200... 300	8	0,167	0,765	250	2000	62500	500000
300... 400	3	0,059	0,824	350	1050	122500	367500
400... 500	6	0,118	0,942	450	2700	202500	1215000
500... 600	2	0,039	0,981	550	1100	302500	605000
600... 700	0	0	0,981	650	0	422500	0
700... 800	2	0,039	1,000	750	1500	562500	1125000
	51				11250		4167500

5 Середнє напрацювання на відмову

$$\bar{t} = \frac{\sum mi \cdot ti}{\sum mi} = \frac{11250}{51} = 221 \text{м год./відмова.}$$

6. Середнє квадратичне відхилення визначаємо за формулою

$$\sigma^2 = a^2 - t^{-2}; a^2 = \frac{\sum mi(ti)^2}{\sum mi} = \frac{4167500}{51} = 81716,$$

$$\sigma^2 = a^2 - t^{-2} = 81716 - 48841 = 32875,$$

$$\sigma = \sqrt{32875} = 181.$$

Приймаємо $\sigma = 181$.

7. Визначаємо розмір коефіцієнта варіації

$$V = \frac{\sigma}{\bar{t}} = \frac{181}{221} = 0,82 .$$

Приклад 2. Вирівнювання дослідного розподілу за експоненціальним законом розглянемо на прикладі даних про напрацювання на відмову шатунних вкладишів автобусів ЗІЛ-158. Результати спостережень наведені в табл.4.2, де *ti* означає пробіг автобусів до відмови шатунних вкладишів двигунів (тис.км), а *mi* - число автобусів, що мають напрацювання *ti*.

Таблиця 4.2 - Результати спостережень

Номер інтервалу	ti	mi	λ_{ti}	$e^{-\lambda ti}$	f(ti)	mi'	$(mi-mi')^{2/}mi'$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	5	0,29	0,7483	0,0217	21,7	12,9
2	20	27	0,58	0,5599	0,0162	16,2	7,2
3	30	26	0,87	0,4189	0,0121	12,1	16,0
4	40	21	1,16	0,3135	0,0091	9,1	15,5
5	50	12	1,45	0,2346	0,0068	6,8	4,0
6	60	6	1,74	0,1755	0,0051	5,1	
7	70	2	2,03	0,1313	0,0038	3,8	0,7
8	80	1	2,32	0,0983	0,0028	2,8	
Сума	-	100	-	-	-	-	56,3

1. Знайдені з табл.4.3 значення *af(t)*ділимо на параметр *a.*

Вирівнювання за законом Вейбулла розглянемо на тому ж прикладі, що й вирівнювання за експоненціальним законом, де $\bar{t} = 33{,}9;\ s_t = 14{,}5$.

Таблиця 4.3 - Вирівнювання за законом Вейбулла

Номер інтервалу	ti	mi	ti/a	af(t)	f(t)	m'_i	$(mi-m'_i)^{2/}m''_i$
1	2	3	4	5	6	7	8

1	10	5	0,26	0,30	0,0079	7,9	1,1
2	20	27	0,52	0,71	0,0186	18,6	3,8
3	30	26	0,78	0,95	0,0250	25,0	0,0
4	40	21	1,05	0,87	0,0229	22,9	0,2
5	50	12	1,31	0,51	0,0134	13,4	0,1
6	60	6	1,57	0,19	0,0050	5,0	
7	70	2	1,83	0,09	0,0025	2,4	0,1
8	80	1	2,10	0,02	0,0005	0,5	
Сума		100					5,3

2. Визначаємо коефіцієнт варіації *Vt*

$$V_t = \frac{14{,}5}{33{,}9} = 0{,}40.$$

3. За табл. А.2 знаходимо значення *b і кb* при *Vt=0,40, b=2,7; kb=0,894*.

4. Обчислюємо параметр

$$a = \frac{\bar{t}}{k_b} = \frac{33{,}9}{0{,}894} \approx 37{,}92 \approx 38.$$

5. Знаходимо значення $\frac{t_i}{a}$ і заповнюємо графу 4 табл.4.2.

6. За табл. А.4 обчислюємо значення *af(t)* і заповнюємо графу 5. Поділивши ці значення на *a = 38*, одержуємо значення щільності. Вирівняні значення частот знаходимо з виразу ширини інтервалу

$$m'_i = \Sigma mi \times h \times f(t).$$

Ці значення m'_i наводимо в графі 7.

Для розглянутого прикладу $\bar{t} = \overline{3}3{,}9$.

7. Обчислюємо параметр λ

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{1}{33{,}9} = 0{,}029\,.$$

Знаходимо значення *λti*.

8. Шляхом логарифмування знаходимо значення $e^{-\lambda \cdot ti}$ (графа 5).

Помноживши значення $e^{-\lambda ti}$ на λ, визначаємо значення щільності ймовірності *f(ti)*.

9. Вирівняні значення m'_i обчислюємо за формулою

$$m'_i = \Sigma mi \times h \times f(ti).$$

Для розглянутого прикладу

$$m\hat{\imath} = 100 \times 10 \times f(ti).$$

Одержані значення заносимо в графу 7.

10. Обчислюємо критерій χ^2 (графа 8) і число ступенів свободи.

Експоненціальний закон - однопараметричний (параметром є розмір λ).

Для χ^2=56,3 за табл.А.3 знаходимо, що $P_к(\chi^2)\approx 0$.

Отже, гіпотеза про експоненціальний розподіл відхиляється.

3. Запитання для самоконтролю

1. Основні залежності між випадковими величинами.
2. Параметри, що характеризують центр групування випадкових величин.
3. Параметри, що характеризують розсіювання випадкових величин.

Практичне заняття 5

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ПОСЛІДОВНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи – розрахунок надійності виробів, що мають послідовне з'єднання елементів.

1. Короткі теоретичні відомості

Надійність будь-якого виробу визначається насамперед надійністю і числом його складових елементів. При цьому ступінь впливу кожного елемента на надійність виробу визначається способом з'єднання елементів.

У теорії надійності розрізняють три способи з'єднання елементів:
- послідовне;
- рівнобіжне;
- комбіноване.

Послідовним називається таке з'єднання елементів у виробі, при якому відмова будь-якого елемента є необхідною і достатньою умовою відмови виробу в цілому.

Якщо представити відмову кожного елемента виробу випадковою незалежною подією, то згідно з множенням імовірностей ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку зазначених елементів

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \ldots \cdot P_n = \prod P_i. \quad (5.1)$$

У випадку, якщо система складається з рівнонадійних елементів

$$P_1 = P_2 = P_3 = \ldots = P_n,$$

то ймовірність безвідмовної роботи системи можна визначити за формулою

$$P(t) = P^n(t). \quad (5.2)$$

2. Приклади та порядок виконання

Приклад 1. Визначити надійність роботи двигуна ЗІЛ-130 за такими вихідними даними:

Найменування основних деталей і вузлів резерву (запасних частин)	Імовірність безвідмовної роботи в інтервалі 80-100 тис.км пробігу
ЦПГ: - гільза	0,94
- поршень	0,88
- поршневі кільця	0,85
- вкладиші корінних підшипників	0,70
- вкладиші шатунних підшипників	0,42
- головка блока циліндрів	0,94
- прокладка головки блока	0,70
- клапан	0,91

Порядок виконання

1 Двигун являє собою систему послідовно з'єднаних елементів. Якщо подати відмову кожного елемента випадковою подією, то за правилом множення ймовірностей надійність роботи двигуна визначається формулою

$$P = P_{1} \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 = \prod_{i=1}^{8} P_i .$$

У даному випадку

$$P_{ЦПГ} = 0,94 \times 0,88 \times 0,85 = 0,70;$$

$$P_{\cdot ц.} = 0,94;$$

$$P_к = 0,91;$$

$$P_{вкл.\ кір.} = 0,70;$$

$$P_{вкл.\ шиють.} = 0,42;$$

$$P_{пр.\ бл.\ ц.} = 0,70.$$

2. Ймовірність безвідмовності всього двигуна

$$P = 0,7\ 0,7\ 0,42\ 0,94\ 0,7\ 0,91 = 0,123.$$

Імовірність безвідмовної роботи двигуна в інтервалі 80-100 тис.км пробігу складає 0,123. Це означає, що при зазначеній надійності вузлів і деталей, тільки 12,3% вузлів і деталей двигуна відпрацює цей пробіг (80-100 тис.км) безвідмовно.

3. Запитання для самоконтролю

1. Основні залежності між випадковими величинами.
2. Параметри, що характеризують центр групування випадкових величин.
3. Параметри, що характеризують розсіювання випадкових величин.
4. Ймовірність безвідмовної роботи системи послідовно з'єднаних елементів.

Практичне заняття 6

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ІЗ РЕЗЕРВУВАННЯМ

Мета роботи – розрахунок показників надійності систем із резервуванням окремих елементів системи чи в цілому.

1. Короткі теоретичні відомості

Для досягнення високої надійності в машинобудуванні конструктивні, технологічні й експлуатаційні заходи можуть виявитися недостатніми і тоді приходиться застосовувати резервування. Це властиво складним системам, для яких підвищенням надійності елементів не вдається досягти необхідної високої надійності системи.

Застосовують постійне резервування з навантаженим резервом; резервування заміщенням із ненавантаженим; резервування з резервом, що працює в полегшеному режимі.

При постійному резервуванні елементі ланцюги підключають паралельно основним. Ймовірність відмови всіх елементів (основного та резервних) за теоремою множення ймовірностей

$$Q_{ст}(t)=\prod_{1}^{n} Q_i(t), \tag{6.1}$$

де $Q_i(t)$ - імовірність відмовлення елемента.

Якщо елементи однакові, то $Q_{ст}(t)=Q^n{}_1(t)$, $P_{ст}=1-Q^n{}_{ст}(t)$.

При резервуванні заміщенням резервні елементи включаються тільки при відмові основних. Для основного випадку експонентного розподілу відмові при малих значеннях λt, тобто при досить високій надійності елементів, ймовірність відмови системи

$$Q_{cm}(t) \approx \frac{\prod_{1}^{n} Q_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod \lambda_i t}{n!}. \qquad (6.2)$$

Якщо елементи однакові, то

$$Q_{cm}(t) \approx \frac{Q^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda t)^n}{n!}. \qquad (6.3)$$

Якщо припустима робота вхолосту резервного двигуна (ненавантажений резерв), то ймовірність безвідмовної роботи системи, при відомій інтенсивності відмов основного елемента λ, резервного λ_p і середнього часу ремонту tp

$$P_{(t)} = \ell^{-\frac{t}{T_0}}. \qquad (6.4)$$

де $T_0 = \frac{1}{\lambda}\left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p)\bar{t}_p}\right]$.

1.1. Роздільне резервування

Припустимо, що деякий вузол досяг граничного стану, наприклад за зносом. Тоді ймовірність роботи цього вузла обчислюють за формулою

$$P_{вузла} = 1 - (1-p)^2. \qquad (6.5)$$

Якщо є $(m-1)$ елементів (вузлів) одного найменування, то його надійність

$$Pi = 1 - (1-Pi)^m. \qquad (6.6)$$

Надійність робочого двигуна, що перебуває з n вузлів, кожний із який зарезервований, у кількості $(m-1)$ штук можна підрахувати за формулою

$$P_{дв} = \prod_{i=1}^{n} P_i = \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \left(1 - P^i\right) m_i\right]. \tag{6.7}$$

У випадку, коли всі елементи двигуна рівнонадійні,

$$P_{дв} = \left[1 - (1 - P) m\right]^n . \tag{6.8}$$

Отже, якщо в запасі (у резерві) буде комплект усіх деталей і вузлів, надійність роботи двигуна обчислюємо за формулою

$$P_{дв} = \prod_{i=1}^{n} P_i = \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \left(1 - P_i\right)^{m_i}\right]. \tag{6.9}$$

1.2. Загальне резервування

Для випадку загального резервування кількість резерву

$$m = \frac{\lg\left(1 - P_a\right)}{\lg\left(1 - P_0\right)^{\frac{1}{n}}} . \tag{6.10}$$

Для роздільного резервування кількість резерву

$$m = \frac{\lg\left(1 - P_в^{\frac{1}{n}}\right)}{\lg\left(1 - P_0\right)^{\frac{1}{n}}} , \tag{6.11}$$

де P_0 - імовірність безвідмовної роботи послідовного ланцюга;

P_a - імовірність безвідмовної роботи ланцюга для випадку рівної надійності всіх елементів;

$P_в$ - імовірність безвідмовної роботи рівнобіжного ланцюга при роздільному резервуванні.

Середнє напрацювання до першої відмови визначається як

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda}, \qquad (6.12)$$

де λ - інтенсивність відмов (з огляду на экспоненціальний закон розподілу).

Ймовірність безвідмовної роботи в даному випадку визначається формулою

$$P(L) = 1 - \frac{L \cdot N}{L_{ср}(n-1)}, \qquad (6.13)$$

де N - число деталей, що знаходяться в робочому стані;

n - число запасних деталей.

Коли встановлені деталі зіпсувались за різними причинами, формула ймовірності безвідмовної роботи має вигляд

$$P = 1 - \frac{NL}{L_{ср}(K_n + 1)}, \qquad (6.14)$$

де $K_n = \frac{K}{K_{об}} = 0.8.$

2. Приклади та порядок виконання

<u>Приклад 1.</u> Проаналізуємо, як зміниться ймовірність безвідмовної роботи ЗІЛ-130 залежно від способу резервування - загального або роздільного.

Порядок виконання

1. У випадку загального резервування, якщо замість окремих вузлів і деталей у

запасі буде двигун, то надійність роботи двигуна з урахуванням резервного буде такою:

$$P_{дв} = 1 - \left(1 - P_{дв}^{p}\right)^2 = 1 - \left(1 - 0.123\right)^2 = 0.23\,. \tag{6.15}$$

Отже, при резервуванні окремих вузлів і деталей надійність двигуна приблизно в 2,4 раза більша, ніж при загальному резервуванні двигуна.

2. За формулою (6.7) визначаємо

$$P_{дв} = \prod_{i=1}^{в}\left[1 - \left(1 - P_i\right)^2\right] = \left[1 - \left(1 - 0{,}7\right)^2\right]^3\left[1 - \left(1 - 0{,}42\right)^2\right]\left[1 - \left(1 - 0{,}94\right)^2\right]\left[1 - \left(1 - 0{,}91\right)^2\right] = 0{,}56\,,$$

Тобто надійність підвищиться в 4,5 раза в порівнянні з двигуном запасного резерву , що не має вузлів і деталей.

Надійність двигуна *P = 0,56* може бути досягнена при загальному резервуванні, але в цьому випадку потрібна велика кількість запасних двигунів. Це різко збільшить вартість резервування.

Приклад 2. Встановлено, що за час *t = 500 год*. вузли та механізми двигуна мали таку ймовірність безвідмовної роботи (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 - Ймовірністі безвідмовної роботи вузлів ДВЗ

Найменування вузла	Імовірність безвідмовної роботи
ЦПГ	0,90
ГРМ	0,80
Система охолодження	0,90
Система мастильна	0,90
Система паливна	0,80
Прилади запалювання	0,70

Порядок виконання

1. Передбачається, що надійність вузлів і механізмів підпорядковується експоненціальному закону. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи $P_{дв}$ і середній час до першої відмови $T_{ср.\ дв.}$ при різних методах і способах резервування.

2. Імовірність безвідмовної роботи двигуна без резервування складе

$$P_{дв}(500) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) = 0.90 \cdot 0.80 \cdot 0.90 \cdot 0.90 \cdot 0.80 \cdot 0.70 = 0.33.$$

$$2\ P_{дв}(500) = l^{-\lambda(t)} = l^{-\lambda \cdot 500},$$

$$0,33 = e^{-\lambda \cdot 500};$$

$$\lambda = 1.1/500 = 2.2 \cdot 10^{-3}.$$

Тоді

$$T_{ср} = \frac{1}{2.2 \cdot 10^{-3}} \approx 455\,год.$$

3. При постійному резервуванні ймовірність безвідмовної роботи складе

$$P_{ст}(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{2\lambda t} = 2P_{дв}(500),$$

де $P_{ст}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи системи, що складається із двох паралельно працюючих двигунів.

Одержимо

$$P_{ст}(500) = 0,551.$$

4. Середній час до першої відмови знаходимо з виразу

$$T_{ср} = \int_0^{\infty} P_{ст}(t)dt = 0\int^{\infty} \left(2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}\right)dt = \frac{3}{2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}} = 682\,год.$$

5. При резервуванні заміщенням для повнокомплектного двигуна (існує запасна частина, що знаходиться на заводі або возиться із собою).

У цьому випадку

$$P_{ст}(500) = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t) = 0.\ 693.$$

6. Середній час до першої відмови

$$T_{ср} = \frac{2}{\lambda} = 910\,год.$$

7. Ефективність резервування в порівнянні з постійним резервуванням складе *0,693:0,551≈ 1,2*.

Из вирішення цієї задачі випливає, що з двох можливих способів резервування заміщенням - цілком агрегатом (двигуном) і деталями або вузлами окремо, найбільш ефективним буде резервування заміщенням деталями (вузлами).

<u>Приклад 3.</u> Визначити кількість елементів (камер), що резервуються для забезпечення надійності роботи двигуна на пробігу *2000 км.*

У даному випадку застосовують резервування заміщенням. Приймаємо середній ресурс камери *Lср = 40 тис. км.*

Порядок виконання

1 Для того, щоб знайти оптимальну кількість деталей (камер) у кожному конкретному випадку, розраховують P для різного запасу і беруть таку кількість запасних частин даного виду, коли при додаванні ще однієї деталі ймовірність безвідмовної роботи двигуна збільшиться незначно:

немає запасних частин (камер)

$$P(L) = 1 - \frac{2000 \cdot 4}{40000 \cdot (0+1)} = 0.8;$$

одна запасна камера

$$P(L) = 1 - \frac{2000 \cdot 4}{40000 \cdot (1+1)} = 0.9;$$

дві запасні камери

$$P(L) = 1 - \frac{2000 \cdot 4}{40000 \cdot (2+1)} = 0.933$$

три запасні камери

$$P(L) = 1 - \frac{2000 \cdot 4}{40000 \cdot (3+1)} = 0.95.$$

чотири запасні камери

$$P(L)=1-\frac{2000}{40000\cdot(4+1)}=0.96.$$

З розрахунку бачимо, що при збільшенні кількості запасних камер від трьох до чотирьох збільшення *P* незначне.

2. Для обліку відсотка зіпсованих камер уведемо коефіцієнт $Д_0$, що визначається як відношення кількості правильно встановлених камер до загальної кількості камер, що встановлені за деякий термін на автомобіль ($К_{об}$).

При трьох запасних камерах одержуємо

$$P=1-\frac{4\cdot 2000}{40000\cdot(0.8\cdot 3+1)}=0.941.$$

При чотирьох запасних камерах

$$P=1-\frac{4\cdot 2000}{40000\cdot(0.8\cdot 4+1)}=0.952.$$

При п`яти запасних камерах

$$P=1-\frac{4\cdot 2000}{40000\cdot(0.8\cdot 5+1)}=0.96.$$

3. Запитання для самоконтролю

1. Практична цінність резервування.
2. Види резервування та їхні характерні риси.
3. Ймовірність безвідмовної роботи систем із резервуванням.

Практичне заняття 7

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОКРЕМИХ ГРУП

Мета роботи – розрахунок та оптимізація допусків на розміри деталей для забезпечення довговічності нерухомих з'єднань.

1. Короткі теоретичні відомості

Під час розрахунку надійності з'єднань з натягом необхідно враховувати розсіювання багатьох факторів: діаметрів вала й отвору, коефіцієнтів тертя, що залежать від стану поверхні, оксидних плівок, випадкового попадання олії, а також зовнішніх навантажень.

Граничний за міцністю зчеплення момент T_{lim}, що може передати з'єднання діаметром d довжиною ℓ з натягом N для тиску на посадкових поверхнях p і коефіцієнті тертя f, дорівнює

$$T_{\lim} = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \pi d^2 \ell p f / K, \tag{7.1}$$

де K=1,5 - коефіцієнт, що враховує можливість зменшення сил зчеплення.

Для з'єднання суцільного вала з втулкою із зовнішнім діаметром D, виготовлених з матеріалів з однаковим модулем пружності E та коефіцієнтом поперечного стиску

$$P = \frac{(N-u)E \cdot 10^{-3}}{d(1+\psi)}, \tag{7.2}$$

де $\psi = \dfrac{1+(d/p)^2}{1-(d/D)^2} \cdot u$ — виправлення на зминання мікронерівностей;

u=1,2(R_{Z1}+R_{Z2}).

Граничний момент T_{lim} розглядаємо як функцію (добуток) двох випадкових величин *p* и f.

Середнє значение T_{lim} граничного моменту T_{lim} визначають за середнім значенням *p* и f.

Імовірність *Pc* безвідмовної роботи з'єднання за критерієм точності зчеплення знаходять за таблицями нормального розподілу залежно від квантиля U_p, який визначається формулою

$$U_p = -\frac{\overline{n}_e - 1}{\sqrt{\overline{n}_e^2 \cdot V_{\lim}^2 + V_T^2}}, \tag{7.3}$$

де $\overline{n}_{c2} = \overline{T}_{\lim} / \overline{T}$ — коефіцієнт запасу міцності зчеплення за середнім значенням моментів.

Імовірність безвідмовної роботи P_n за критерієм міцності деталей визначаємо залежно від квантиля

$$U_p = -\frac{\overline{n}_n - 1}{\sqrt{\overline{n}_n^2 \cdot V_t^2 + V_p^2}}, \tag{7.4}$$

де $\overline{n}_n = \overline{\sigma}_{t2} / \overline{\sigma}_{экв}$— коефіцієнт запасу міцності за середнім значенням межі текучості $\overline{\sigma}_{T2}$ і напруженості $\sigma_{экв}$;

V_t— коефіцієнт варіації межі текучості.

Надійність з'єднання з натягом, що характеризується ймовірністю безвідмовної роботи *P,* визначають як добуток імовірностей P_c, і P_N.

2. Приклади та порядок виконання

Приклад 1. З'єднання зубчастого колеса із суцільним валом діаметром *d = 48 мм* відповідає посадці *H8/x8*. З'єднання навантажене крутним моментом *T*, заданим нормально розподіленим розміром із середнім значенням *T = 1050 Н.м* і коефіцієнтом варіації *v = 0,12*.

Визначити ймовірність безвідмовної роботи з'єднання за критерієм міцності зчеплення, якщо відомо, що діаметр маточини зубчастого колеса *D = 85 мм*, довжина посадкової поверхні *l = 60 мм*, висота мікронерівностей посадкових поверхонь RZ_1 *= 4мкм*, RZ_2 *= 6 мкм*, модуль пружності матеріалу (сталь) деталей *E = 2,1-105 МПа*, середнє значення і коефіцієнт варіації коефіцієнта тертя відповідно дорівнюють *f = 0,12, νf = 0,1*, коефіцієнт , що враховує зменшення тиску, дорівнює *K=1,5.*

Порядок виконання

1 Середнє значення *N* і коефіцієнт варіації ϑ_N натягу визначаємо залежно від допусків діаметрів вала й отвори *t = te = t:= 39 мкм*, а також нижнього відхилення діаметра вала *ei = 97 мкм* (значення вибрані за таблицями допусків) *H = ei=97* мкм; $\vartheta_N = \sqrt{2}t/6ei = \sqrt{2}\cdot 39/6\cdot 97 = 0{,}0948$.

Поправка на зминання мікронерівностей

$$U = 1{,}2\left(R_{Z1} + R_{Z2}\right) = 1{,}2\left(4+6\right) = 12\,мкм.$$

Коефіцієнт

$$\psi = \frac{1+\left(d/D\right)^2}{1-\left(d/D\right)^2} = \frac{1+\left(48/85\right)^2}{1-\left(48/85\right)^2} = 1{,}936.$$

2. Середнє значення тиску на посадковій поверхні

$$p = \frac{\left(\overline{N}-n\right)E\cdot 10^{-3}}{d\left(1+\psi\right)} = \frac{\left(97-12\right)2{,}1 10^5 10^{-3}}{48\left(1+1{,}936\right)} = 126{,}7\,МПа.$$

3. Коефіцієнт варіації тиску *p*

$$V_p = V_N\cdot\frac{1}{\left(1+4/\overline{N}\right)} = 0{,}0948\cdot\frac{1}{\left(1-12/97\right)} = 0{,}108 \quad .$$

4. Середнє значення та коефіцієнт варіації граничного за міцністю зчеплення моменту

$$\overline{T}_{eim} = 0{,}5\cdot 10^{-3}\pi d^2 l\overline{p}\overline{f}\,\frac{1}{k} = 0{,}5\cdot 10^{-3} 3{,}14 48^2 60 126{,}7 0{,}12\frac{1}{1{,}5} = 2200 H\cdot M$$

$$\nu_{\lim} = \sqrt{\nu_p^2 + \nu_f^2} = \sqrt{0{,}108^2 + 0{,}1^2} = 0{,}148\,.$$

5. Коефіцієнт запасу міцності зчеплення по середніх значеннях

$$n_c = \frac{\overline{T}_{eim}}{\overline{T}} = \frac{2200}{1050} = 2{,}09\,.$$

6. Квантиль нормованого нормального розподілу

$$U_p = -\frac{n_c - 1}{\sqrt{n_c V_{eim}^2 + V_T^2}} = -\frac{2{,}09 - 1}{\sqrt{2{,}09^2 \cdot 0{,}148^2 + 0{,}12^2}} = -3{,}285\,.$$

7. Імовірність безвідмовної роботи P_c за критерієм міцності зчеплення, визначена за таблицею додатка А.5 залежно від *Up*, дорівнює *0,9995*.

Приклад 2. Визначити ймовірність безвідмовної роботи з'єднання з натягом за критерієм міцності деталі. Характеристики з'єднання наведені в попередньому прикладі. Середнє значення межі текучості матеріалу деталі, становить σ_{t_2} = *580 МПа*, коефіцієнт варіації *Vt = 0,06*.

Порядок виконання

1 Середнє значення та коефіцієнт варіації еквівалентної напруги в посадковій поверхні колеса

$$\overline{\sigma}_{'kb} = \frac{2\overline{p}}{1-(d/D)^2} = \frac{2 \cdot 126{,}7}{1-(48/85)^2} = 372 МПа;$$

Vэкв = Vp = 0,108.

2. Коефіцієнт запасу міцності при середніх напругах

$$n_n = \overline{\sigma}_t / \overline{\sigma}_{'kb} = 580/372 = 1{,}56\,.$$

3. Квантиль нормованого нормального розподілу

$$U_n = -\frac{n_n - 1}{\sqrt{n_n^2 V_t^2 + V_{'kb}^2}} = -\frac{1{,}56 - 1}{\sqrt{1{,}56^2 \cdot 0{,}06^2 + 0{,}108^2}} = -3{,}92\,.$$

4. Імовірність безвідмовної роботи P_n за критерієм міцності деталі (табл. А.5) *Pn > 0,9999*.

Приклад 3. Дві сталеві деталі стягнуті болтом *М12-6g-R(P=1,75мм, dp=10,35 мм)* класу міцності 6.6. З'єднання навантажене розтягувальною силою, що змінюється від *0 до F*. Середнє значення сили $F = 9.\ 10^3\ H$, коефіцієнт варіації сили $V_F = 0{,}1$. Оцінити ймовірність безвідмовної роботи з основних критеріїв.

Порядок виконання

1. Приймаємо $\chi = 0{,}2;\ \sigma_t = 360\ МПа\ ;\ \overline{\sigma}_{-1} = 220\ МПа;\ V_{\sigma t} = 0{,}06;\ \overline{\sigma}_{зат} = 0{,}5\sigma_t = 180\ МПа;\ \beta із=1{,}1;\ k_\sigma=3{,}0;\ E_\sigma=1{,}0;\ \beta_{уп}=1{,}0;\ \beta = 1{,}0;\ \Psi = 0{,}1;\ Vзат=0{,}09;\ Vд =.\ 0{,}07;\ Vпл = 0{,}1;\ Va = 0{,}023.$

2. Обчислюємо середнє значення сили затягування

$Fзат = 0{,}5\ \sigma \cdot t \cdot \pi \cdot d_p^2 / 4 = 1{,}51 \cdot 10^{-4}\ H$.

3. Коефіцієнт запасу не розкриття стику при середніх навантаженнях

$$\overline{n}_1 = \frac{\overline{F}_{зат}}{\beta_c \overline{F}(1-\chi)} = \frac{1{,}51 \cdot 10^{-4}}{1{,}1 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot (1-0{,}2)} = 1{,}906 .$$

4. Квантиль

$$U_{p1} = -\frac{\overline{n}_1 - 1}{\sqrt{\overline{n}_1^2 \cdot V_{зат}^2 + \nu_F^2}} = \frac{1{,}9-1}{\sqrt{1{,}906^2 \cdot 0{,}09^2 + 0{,}1^2}} = -4{,}533 .$$

5. За табл. А.5 знаходимо ймовірність безвідмовної роботи з критерію не розкриття стику $P_1 > 0{,}9999$.

6. Середнє значення розрахункової напруги

$$\overline{\sigma}_{рас} = \frac{4}{\pi d_p^2} \cdot \left(1{,}3\overline{F}_{зат} + \chi \cdot \overline{F}\right) = \frac{4}{3{,}14 \cdot 10{,}35^2}\left(1{,}3 \cdot 1{,}51 \cdot 10^4 + 0{,}2 \cdot 9 \cdot 10^3\right) = 255 МПа .$$

7. Коефіцієнт запасу міцності при середніх напругах

$\overline{n}_3 = \overline{\sigma}_{=t,} / \overline{\sigma}_{рас} = 360/\ 255=1{,}412.$

8. Квантиль *Upз* зурахуванням того, що $Vpac = Vзат,$

$$U_{pз} = -\frac{\overline{n}_3 - 1}{\sqrt{\overline{n}_3^2 V_{\sigma_t}^2 + V_{зат}^2}} = \frac{1{,}412-1}{\sqrt{1{,}412^2 \cdot 0{,}06^2 + 0{,}09^2}} = -3{,}333 .$$

9 Імовірність безвідмовної роботи з критерію статичної міцності $Pa=0{,}9995$.

10. Середнє значення межі витривалості болта

$$\overline{\sigma}_{-1g} = \overline{\sigma}_{-1}\frac{\text{E}\sigma}{\kappa_{\sigma}}\beta\ \beta_{уп} = 220\cdot\frac{1}{3}\cdot 1{,}1\cdot 1{,}0 = 73{,}7\,МПа\,.$$

Середнє значення діючої напруги

$$\overline{\sigma}_{a} = \frac{4}{\pi d_p^2}\left[0{,}5\chi\overline{F} + \frac{\Psi}{\kappa_{\sigma}}\left(\overline{F}_{зат} + 0{,}5\chi\overline{F}\right) = \right.$$

$$= \frac{4}{3{,}14\cdot 10{,}35^2}\left[0{,}5\cdot 0{,}2\cdot 9\cdot 10^3 + \frac{0{,}1}{3}\left(1{,}51\cdot 10^4 + 0{,}5\cdot 0{,}2\cdot 9\cdot 10^3\right) = 17\,МПа\right.$$

11. Коефіцієнт запасу міцності при середніх напругах $n_4 = \overline{\sigma}_{-1q} / \overline{\sigma}_a = 73{,}7/17 = 4{,}3$.

12. Коефіцієнт варіації межі витривалості

$$V_{-1q} = \sqrt{V_q^2 + V_{пл}^2 + V_a^2} = \sqrt{0{,}07^2 + 0{,}1^2 + 0{,}023^2} = 0{,}124\,.$$

13. Квантиль

$$U_{p4} = \frac{\overline{n}_4 - 1}{\sqrt{\overline{n}_4^2\cdot V_{-1q}^2 + V_F^2}} = \frac{4{,}3 - 1}{\sqrt{4{,}3^2\cdot 0{,}124^2 + 0{,}1^2}} = -6{,}08\,.$$

14. Імовірність безвідмовної роботи з'єднання

$P = P_1P_3P_4 = 0{,}9999\times 0{,}9995\times 1 = 0{,}9994.$

3. Запитання для самоконтролю

4. Квантиль нормального нормованого розподілу за критерієм точності й міцності зчеплення за середнім значенням моментів.
5. Визначення ймовірності безвідмовної роботи з'єднання за критерієм міцності зчеплення.
6. Коефіцієнт запасу міцності за середнім значенням межітекучості.

Практичне заняття 8

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОКРЕМИХ ГРУП

Мета роботи – визначення надійності зубчастої передачі за критеріями опору контактної втоми й опору втоми при вигині.

1 Короткі теоретичні відомості

Ймовірність безвідмовної роботи *P* зубчастої передачі визначаємо як добуток ймовірностей безвідмовної роботи за окремих критеріїв. Ймовірність безвідмовної роботи *Pн* за критерієм опору контактної втоми визначаємо як ймовірність того, що контактна напруга (розрахунковий параметр) σ_H не перевищує межі контактної витривалості (граничного значення розрахункового параметра) $\sigma_{H\lim}$,.

Ймовірність безвідмовної роботи з критерію опору контактної втоми P_H визначають залежно від величини квантиля

$$U_p = -\frac{\bar{n}_H - 1}{\sqrt{\bar{n}_H^2 \cdot V_{H\lim}^2 + V_{\sigma H}^2}} \quad , \tag{8.1}$$

де n – коефіцієнт запасу міцності по середніх напругах,

$$\bar{n}_H = \bar{\sigma}_{H\lim} / \bar{\sigma}_H \, . \tag{8.2}$$

Ймовірність безвідмовної роботи з критерію опору втоми при вигині P_F визначають залежно від квантиля

$$U_p = -\frac{\bar{n}_F - 1}{\sqrt{\bar{n}_F^2 \cdot V_{F\lim}^2 + V_{\sigma F}^2}} \ , \tag{8.3}$$

де n– коефіцієнт запасу міцності по середніх напругах,

$$\bar{n}_F = \bar{\sigma}_{F\lim} / \bar{\sigma}_F . \tag{8.4}$$

У подальших розрахунках приймають менше значення.

Просте перемножування ймовірностей унаслідок корельованості різних критеріїв дієздатності приводить до заниження ймовірності безвідмовної роботи. Для уточнених розрахунків імовірність безвідмовної роботи рекомендується обчислювати за такою наближеною залежністю

$$\frac{1}{P} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{P_i} - (n-1), \tag{8.5}$$

де P_i – імовірність безвідмовної роботи з i-го критерію;

n – число критеріїв.

2. Приклади та порядок виконання роботи

Приклад 1. Для циліндричної прямозубої передачі розрахувати ймовірність безвідмовної роботи за критерієм опору контактної втоми. Середнє значення контактних напружень $\bar{\sigma}_H = 600$ МПа, середні значення коефіцієнтів $\bar{K}_A = 1; \bar{K}_{H\beta} = 1{,}15; \bar{K}_{HV} = 1{,}2 \quad \bar{K}_{H\alpha} = 0{,}8$; коефіцієнт варіації коефіцієнта зовнішнього навантаження $\nu_A = 0{,}1$. Колеса виготовлені з поліпшених сталей; середнє значення межі витривалості $\bar{\sigma}_{\mathrm{H}\lim} = 780 МПа$.

Порядок виконання

1. Визначаємо коефіцієнти варіації коефіцієнтів навантаження

$$\nu_{\mathrm{H}\beta} = \frac{1}{9}\frac{\bar{\mathrm{K}}_{\mathrm{H}\beta} - 1}{\bar{\mathrm{K}}_{\mathrm{H}\beta}} = \frac{1}{9}\cdot\frac{1{,}15-1}{1{,}15} = 0{,}014;$$

$$\nu_{\mathrm{H}V} = 0{,}17\frac{\bar{\mathrm{K}}_{\mathrm{H}V} - 1}{\bar{\mathrm{K}}_{\mathrm{H}V}} = 0{,}17\cdot\frac{1{,}2-1}{1{,}2} = 0{,}028;$$

$$\nu_{Hl} = 0{,}05\,,$$

$$\nu_{H\Sigma} = \sqrt{\nu_a^2 + \nu_{H\beta}^2 + \nu_{HV}^2 + \nu_{H\alpha}^2} = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}014^2 + 0{,}028^2 + 0{,}05^2} = 0{,}116\,.$$

2. Коефіцієнт варіації контактної напруги

$$\nu_{\sigma H} = 0{,}5\nu_{H\Sigma} = 0{,}5 \cdot 0{,}116 = 0{,}058\,.$$

3. Приймаючи коефіцієнт варіації базового зразка $\nu^0_{H\lim} = 0{,}09$, визначаємо коефіцієнт варіації зубчастого колеса

$$\nu_{H\lim} = \sqrt{\left(\nu^0_{H\lim}\right)^2 + 0{,}05^2} = \sqrt{0{,}09^2 + 0{,}05^2} = 0{,}103\,.$$

4. Коефіцієнт запасу міцності за середніми напруженнями

$$n_H = \sigma_{H\lim} / \bar{\sigma}_H = 780/600 = 1{,}3\,.$$

5. Квантиль нормального розподілу

$$U_p = -\frac{n_H - 1}{\sqrt{n_H^2 \cdot \nu_{H\lim}^2 + \nu_{2\sigma_H}^2}} = -\frac{1{,}3 - 1}{\sqrt{1{,}2^2 \cdot 0{,}103^2 + 0{,}058^2}} = -2{,}197\,.$$

6. За табл.А.5 залежно від Up визначаємо ймовірність безвідмовної роботи за критерієм опору контактної втоми P = 0,986.

Приклад 2. Розрахувати ймовірність безвідмовної роботи колеса прямозубої циліндричної передачі за критерієм опору втоми при вигині.

Матеріал зубчастого колеса - сталь 45; термообробка - поліпшення; твердість зуба колеса HB300. Коефіцієнт довговічності KFL=1 і коригувальні коефіцієнти Ki=1.

Середнє значення і коефіцієнт варіації напруження вигину в небезпечному розрізі зуба відповідно дорівнюють $\bar{\sigma}_F = 280 МПа,\ \ \nu_{\sigma F} = 0{,}12$.

Порядок виконання

1 Відповідно до рекомендацій для поліпшених коліс приймаємо коефіцієнт

варіації межі витривалості базового зразка $\nu^0_{F\lim} = 0{,}09$, а середнє значення $\bar{\sigma}^0_{F\lim}$ обчислимо за формулою

$$\bar{\sigma}^0_{F\lim} = (1{,}35\text{HB} + 100)\frac{1}{1 + U_p \cdot \nu^0_{F\lim}} = (1{,}35 \cdot 300 + 100)\frac{1}{1 + 1{,}28 \cdot 0{,}09} = 571 МПа.$$

2 Визначаємо середнє значення та коефіцієнт варіації межі витривалості зубчастого колеса

$$\bar{\sigma}_{F\lim} = \bar{\sigma}^0_{F\lim} \text{K}_Z \text{K}_{FL} \prod_i^m K_i = 571 \cdot 0{,}8 \cdot 1 \cdot 1 = 457 МПа;$$

$$\nu_{F\lim} = \sqrt{\left(\chi_Z \nu^0_{F\lim}\right)^2 + 0{,}14^2} = \sqrt{(0{,}6 \cdot 0{,}9)^2 + 0{,}14^2} = 0{,}15,$$

де Kz = 0,8 і χ_Z = 0,6 - коефіцієнти, вибрані залежно від $\nu^{0F\lim}$.

3. Коефіцієнт запасу міцності за середніми напруженнями

$$\bar{n}_F = \bar{\sigma}_{F\lim} / \bar{\sigma}_F = 457/280 = 1{,}63.$$

4. Квантиль нормованого нормального розподілу

$$U_p = \frac{\bar{n}_F - 1}{\sqrt{\bar{n}_F^2 \nu^2_{F\lim} + \nu_{\sigma_F^2}}} = \frac{1{,}63 - 1}{\sqrt{1{,}63^2 \cdot 0{,}15^2 + 0{,}12^2}} = -2{,}31.$$

5. За квантилем Up знаходимо ймовірність безвідмовної роботи зубчастого колеса *P = 0,9895*.

3. Запитання для самоконтролю

1. Критерії розрахунку імовірності безвідмовної роботи зубчастих з'єднань.
2. Основні залежності показників надійності зубчастих з'єднань при розрахунку на контактну втому.
3. Розрахунок показників надійності зубчастих з'єднань за критерієм опору втоми при вигині.

Практичне заняття 9

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОКРЕМИХ ГРУП

Мета роботи - визначення надійності деталей машин з використанням кореляційно-регресійного аналізу і методу найменших квадратів.

1. Короткі теоретичні відомості

Для визначення надійності деталей машин із використанням кореляційно-регресійного аналізу необхідно:

- знати параметри рівняння регресії;
- знати тісноту зв'язку (коефіцієнти кореляції та детермінації).

Залежність умовного математичного сподівання $m_{y/x}$ від x називають регресією В по Х. Залежність $n_{x/y}$, від у відповідає регресії Х по У. Для нормально розподілених величин У и Х рівняння регресії В по Х має вигляд

$$m_{y/x} = m_y + \rho \frac{S_y}{S_x}(x - m_x), \tag{9.1}$$

для регресії Х по В

$$m_{x/y} = m_x + \rho \frac{S_x}{S_y}(y - m_y), \tag{9.2}$$

де р – коефіцієнт кореляції;

m_x, m_y, S_x, S_y – математичні сподівання середні квадратичні відхилення випадкових величин Х та У відповідно.

Найважливішою областю застосування кореляційного аналізу до задач надійності є обробка й узагальнення результатів експлуатаційних спостережень.

Оцінку r - коефіцієнта кореляції р визначають за формулою

$$r = \frac{\sum \left(x_i - \overline{x}\right) \cdot \left(y_i - \overline{y}\right)}{(n-1) \cdot S_x \cdot S_y}, \tag{9.3}$$

де $\overline{x}$, $\overline{y}$ – оцінки математичних сподівань m_x і m_y, тобто середні з n спостережень значень $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$; $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum y_i$;

S_x, S_y – оцінки середніх квадратичних відхилень Sx: і Sy відповідно

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left(x_i - \overline{x}\right)^2} \tag{9.4}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left(y_i - \overline{y}\right)^2} \ . \tag{9.5}$$

Параметри лінійної регресійної залежності доцільно визначати за методом найменших квадратів.

Оцінкою лінії регресії є емпірична лінія регресії, рівняння якої має вигляд

$$У = b_0 + bx. \tag{9.6}$$

Коефіцієнти регресії b і b_0 знаходимо методом найменших квадратів, в основу якого покладено вимогу мінімізації квадратів відхилень реалізації (результатів вимірювань) випадкової величини від лінії регресії:

Після нескладних перетворень одержуємо систему нормальних рівнянь

$$nb_0 + b\sum x_i = \sum y_i; \tag{9.7}$$

$$b_0 \sum x_i + b\sum x_i^2 = \sum y_i x_i \tag{9.8}$$

Із вирішення системи одержуємо формули для коефіцієнтів b і b_0

$$b = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2}; \qquad (9.9)$$

$$b_0 = \frac{1}{n}\left(\sum y_i - b\sum x_i\right). \qquad (9.10)$$

2. Приклади та порядок виконання роботи

Приклад 1. Для десяти підприємств є дані про напрацювання на відмову та якості виготовлення деталі №1. Потрібно провести кореляційно-регресивний аналіз зв'язку між двома ознаками: напрацюванням на відмову та якістю виготовлення. Вихідні дані для визначення показників кореляційного зв'язку наведено в табл.9.1.

Таблиця 9.1-Вихідні дані для визначення показників кореляційного зв'язку

№ п/п	Напрацювання на відмову, год. (у)	Якість виробництва, (х)	ху	$У^2$	$х^2$	Очікуване значення надійності, год.
1	28,0	79	2212,0	784,00	6241	27,84
2	21,0	70	1470,0	441,00	4900	19,48
3	27,6	80	2208,0	761,76	6400	28,77
4	16,2	71	1150,2	262,44	5041	20,40
5	29,7	77	2286,9	882,09	5929	25,98
6	26,8	77	2063,6	718,24	5929	25,98
7	30,3	84	2545,2	918,09	7056	32,48
8	15,7	66	1036,2	246,49	4356	15,77
9	25,5	74	1887,0	650,25	5476	23,20
10	15,8	67	1058,6	249,64	4489	16,70
Всього	236,6	745	17917,7	5914,00	55817	236,6
Середнє	23,66	74,5	1791,77	591,400	5581,7	23,66

Порядок виконання

1 Зв'язок між двома ознаками напрацювання на відмову і якістю виготовлення близький до прямолінійного, і його можна виразити рівнянням прямої лінії

$$в = b_0 + bx.$$

Вирішення рівняння регресії покаже зміну напрацювання на відмову під впливом якості виготовлення за винятком випадкових коливань ознаки.

2 Параметри рівняння прямої b_0 і b знайдемо, вирішуючи систему нормальних рівнянь методом найменших квадратів

$$nb_0 + b\sum x_i = \sum y_i \,,$$

$$b_0\sum x_i + b\sum x_i^2 = \sum y_i x_i \,,$$

звідки за вихідними даними табл. 1 визначаємо

$$b = \frac{n\sum yx - \sum y \cdot \sum x}{n\sum x^2 - \sum x \cdot \sum x} = \frac{10 \cdot 17917,7 - 236,6 \cdot 745}{10 \cdot 55817 - 745 \cdot 745} = 0,9286 \text{ год.};$$

$$b_o = \frac{1}{n} \cdot \left(\sum y_i - b \cdot \sum x_i\right) = \frac{1}{10}\left(236,6 - 0,9286 \cdot 745\right) = -45,52 \text{ год.}$$

3. Рівняння регресії (кореляційне рівняння), що виражає зв'язок між напрацюванням на відмову (у) і якістю виготовлення (х) матиме вигляд

$$Yx = -45,52 + 0,9286x..$$

4. Перевіримо погодженість вирішення системи рівнянь, виходячи з рівності

$$y = b_0 + bx;$$

$$23,66 = -45,52 + 0,9286\ 74,5;$$

$$23,66 = 23,66.$$

5. За рівнянням регресії розрахувують очікувані (розрахункові або теоретичні) значення наробітку на відмову (y_x) при різних значеннях (х).

Для цього замість **х** підставимо його конкретні значення

$$yx_{=79} = -45,52 + 0,9286 \cdot 79 = 27,84 \text{ год};$$

$$yx_{=70} = -45,52 + 0,9286 \cdot 70 = 19,48 \text{ год.}$$

6. Перевіряють погодженість усіх розрахунків шляхом зіставлення сум фактичного та розрахункового напрацювання на відмову

$$\sum y = \sum y_x = 236{,}60.$$

7. Визначають тісноту зв'язку між досліджуваними ознаками (напрацювання на відмову і якістю виготовлення).

Розрахуємо лінійний коефіцієнт кореляції

$$\tau = \frac{\overline{xy} - \overline{x}\overline{y}}{S_x S_y};$$

$$xy = \frac{\sum xy}{n} = \frac{17917{,}7}{10} = 1791{,}77;$$

$$x = \frac{\sum x}{n} = \frac{745}{10} = 74{,}5;$$

$$y = \frac{\sum y}{n} = \frac{236{,}6}{10} = 23{,}66;$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - x^2} = \sqrt{\frac{55817}{10} - 74{,}5} = 5{,}61;$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n} - y^2} = \sqrt{\frac{5914}{10} - 23{,}66^2} = 5{,}62;$$

$$\tau = \frac{xy - x \cdot y}{S_x \cdot S_y} = \frac{1791{,}77 - 74{,}5 \cdot 23{,}66}{5{,}61 \cdot 5{,}62} = \frac{29{,}10}{31{,}53} = 0{,}9229.$$

3. Запитання для самоконтролю

1. Визначення тісноти зв'язку між випадковими величинами.

2. Визначення параметрів лінійної регресії методом найменших квадратів.

3. Поняття кореляційного моменту і коефіцієнта кореляції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин. - М.: Высш. шк., 1988. - 238 с.

2. Грешников В.А., Волков Б.Н., Кубарев А.И. Статистические методы обработки эмпирических данных. М.: Изд - во стандартов, 1978. - 232 с.

3. Прейсман В.И. Основы надёжности сельскохозяйственной техники / 2-е изд., доп. и перераб. – К.: Вища шк., 1988. – 247 с.

Додаток А - Параметри функцій розподілу

Таблиця А.1 - Функція расподілу F(t) нормального закону

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,5	504	508	512	516	520	524	528	532	536
0,1	0,54	544	548	552	556	560	564	568	571	575
0,2	0,579	583	587	591	595	599	603	606	610	614
0,3	0,618	622	626	629	633	637	641	644	648	652
0,4	0,655	659	663	666	670	674	677	681	684	688
0,5	0,691	695	699	702	705	709	712	716	719	722
0,6	0,726	729	732	736	739	742	745	749	752	755
0,7	0,758	761	764	767	770	773	776	779	782	785
0,8	0,788	791	794	797	800	802	805	808	811	813
0,9	0,816	819	821	824	826	829	831	834	837	839
1	0,841	844	846	849	851	853	855	858	860	862
1,1	0,864	867	869	871	873	875	877	879	881	883
1,2	0,885	887	889	891	893	894	896	898	900	902
1,3	0,903	905	907	908	910	911	913	915	916	918
1,4	0,919	921	922	924	925	926	929	929	931	932
1,5	0,933	934	936	937	938	939	941	942	943	944
1,6	0,945	946	947	948	950	951	952	953	954	955
1,7	0,955	956	957	958	959	960	961	962	962	963
1,8	0,964	965	966	966	967	968	969	969	970	971
1,9	0,971	972	973	973	974	974	975	976	976	977
2	0,977	978	978	979	979	980	980	981	981	982
2,1	0,982	983	983	983	984	984	985	985	985	986
2,2	0,986	986	987	987	987	988	988	988	989	989
2,3	0,989	990	990	990	990	991	991	991	991	992
2,4	0,992	992	992	992	993	993	993	993	993	994
2,5	0,994	994	994	994	994	995	995	995	995	995
2,6	0,995	995	995	996	996	996	996	996	996	996
2,8	0,997	998	998	998	998	998	998	998	998	998
3	0,999	999	999	999	999	999	999	999	999	999

Таблиця А2 - Параметри та коефіцієнти закону розподілу Вейбулла

b	k	C	v	b	k	C	v
0,683			1,5				
0,589			1,8				
0,545			2				
0,463			2,5				
0,441			3				
0,8	1,133	1,428	1,261	1,62	0,896	0,567	0,633
0,82	1,114	1,367	1,227	1,64	0,895	0,56	0,626
0,832	1,1	1,424	1,2		0,894		
0,84	1,096	1,311	1,196	1,66	0,892	0,553	0,619
0,88	1,066	1,214	1,139	1,7	0,892	0,54	0,605
0,9	1,052	1,171	1,113	1,72	0,891	0,534	0,599
0,92	1,04	1,132	1,088	1,74	0,89	0,528	0,593
0,96	1,018	1,061	1,042	1,78	0,889	0,517	0,581
0,98	1,009	1,029	1,02	1,8	0,889	0,511	0,575
1	1	1	1	1,82	0,888	0,506	0,569
1,04	0,984	0,947	0,962	1,84	0,888	0,501	0,564
1,08	0,971	0,9	0,927	1,86	0,888	0,496	0,588
1,12	0,959	0,858	0,894	1,88	0,888	0,491	0,553
1,16	0,949	0,821	0,865	1,9	0,887	0,486	0,547
1,2	0,941	0,787	0,837	1,92	0,887	0,481	0,542
1,24	0,933	0,757	0,811	1,94	0,887	0,476	0,537
1,28	0,926	0,729	0,787	1,96	0,887	0,472	0,532
1,32	0,921	0,704	0,765	1,98	0,886	0,468	0,527
1,36	0,916	0,681	0,744	2	0,886	0,463	0,523
1,4	0,911	0,66	0,724	2,02	0,886	0,459	0,518
1,42	0,909	0,65	0,714	2,04	0,886	0,455	0,513
1,44	0,908	0,64	0,705	2,06	0,886	0,451	0,509
1,46	0,906	0,631	0,696	2,08	0,886	0,447	0,505
1,48	0,904	0,622	0,687	2,1	0,886	0,443	0,5
1,5	0,903	0,613	0,679	2,12	0,886	0,439	0,496
1,52	0,901	0,605	0,671	2,14	0,886	0,436	0,492
1,54	0,9	0,597	0,663	2,16	0,886	0,432	0,488
1,56	0,899	0,589	0,655	2,18	0,886	0,428	0,484
1,58	0,898	0,581	0,647	2,2	0,886	0,425	0,476
1,6	0,897	0,574	0,64	2,22	0,886	0,421	0,476
2,24	0,886	0,418	0,472	3,24	0,896	0,304	0,339
2,26	0,886	0,415	0,468	3,26	0,896	0,302	0,337
2,28	0,886	0,412	0,465	3,28	0,897	0,301	0,335
2,3	0,886	0,408	0,461	3,3	0,897	0,299	0,334
2,32	0,886	0,405	0,457	3,32	0,897	0,298	0,332
2,34	0,886	0,402	0,454	3,34	0,898	0,296	0,33
2,36	0,886	0,399	0,451	3,36	0,898	0,295	0,328
2,38	0,886	0,396	0,447	3,38	0,898	0,293	0,326
2,4	0,886	0,393	0,444	3,4	0,898	0,292	0,325
2,42	0,887	0,391	0,441	3,42	0,899	0,29	0,323
2,44	0,887	0,388	0,437	3,44	0,899	0,289	0,321
2,46	0,887	0,385	0,434	3,46	0,899	0,287	0,32
2,48	0,887	0,382	0,431	3,48	0,899	0,286	0,318
2,5	0,887	0,38	0,428	3,5	0,9	0,285	0,316
2,52	0,887	0,377	0,425	3,52	0,9	0,283	0,315
2,54	0,888	0,347	0,422	3,54	0,9	0,282	0,313
2,56	0,888	0,372	0,419	3,56	0,901	0,281	0,312

Таблиця А.3 - Таблиця ймовірностей P для критерію К. Пирсона χ^2

χ^2	к								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,6065	0,8013	0,9098	0,9626	0,9856	0,9948	0,9982	0,9994	0,9998
2	0,3697	0,5724	0,7358	0,8491	0,9197	0,9598	0,981	0,9915	0,9963
3	0,2231	0,3916	0,5578	0,7	0,8088	0,885	0,9344	0,9643	0,9814
4	0,1353	0,2615	0,406	0,5494	0,6767	0,7798	0,8571	0,9114	0,9473
5	0,0821	0,1718	0,2873	0,4159	0,5438	0,66	0,7576	0,8343	0,8912
6	0,498	0,1116	0,1991	0,3062	0,4232	0,5398	0,6472	0,7399	0,8153
7	0,0302	0,0719	0,1359	0,2206	0,3208	0,4289	0,5356	0,6371	0,7254
8	0,0183	0,046	0,0916	0,1562	0,2381	0,3326	0,4335	0,5341	0,6288
9	0,0111	0,0293	0,0611	0,1091	0,1736	0,2527	0,3423	0,4373	0,5321
10	0,0067	0,0186	0,0404	0,0752	0,1247	0,1886	0,265	0,3505	0,4405
11	0,0041	0,0117	0,0266	0,0514	0,0884	0,1386	0,2017	0,2757	0,3575
12	0,0025	0,0074	0,0174	0,0348	0,062	0,1006	0,1512	0,2133	0,2851
13	0,015	0,0046	0,0113	0,0234	0,043	0,0721	0,1119	0,1626	0,2237
14	0,0009	0,0029	0,0073	0,0156	0,0296	0,0512	0,0818	0,1223	0,173
15	0,0006	0,0018	0,0047	0,0104	0,0203	0,036	0,0591	0,0909	0,1321
16	0,0003	0,0011	0,003	0,0068	0,0138	0,0251	0,0424	0,0669	0,0996
17	0,0002	0,0007	0,0019	0,0045	0,0093	0,0174	0,0301	0,0487	0,0744
18	0,0001	0,0004	0,0012	0,0029	0,0062	0,012	0,0212	0,0352	0,055
19	0,0001	0,0003	0,0008	0,0019	0,0042	0,0082	0,0149	0,0252	0,0403
20	0	0,0002	0,0005	0,0013	0,0028	0,0056	0,0103	0,0179	0,0293
21	0	0,0001	0,0003	0,0008	0,0018	0,0038	0,0071	0,0126	0,0211
22	0	0,0001	0,0002	0,0005	0,0012	0,0025	0,0049	0,0089	0,0151
23	0	0	0,0001	0,0003	0,0008	0,0017	0,0034	0,062	0,0107
24	0	0	0,0001	0,0002	0,0005	0,0011	0,0023	0,0043	0,0076
25	0	0	0,0001	0,0001	0,0003	0,0008	0,0016	0,003	0,0053
26	0	0	0	0,0001	0,0002	0,0005	0,001	0,002	0,0037
27	0	0	0	0,0001	0,0001	0,0003	0,0007	0,0014	0,0026
28	0	0	0	0	0,0001	0,0002	0,0005	0,001	0,0018
29	0	0	0	0	0,0001	0,0001	0,0003	0,0006	0,0012
30	0	0	0	0	0	0,0001	0,0002	0,0004	0,0009

Продовження табл. А.3

χ^2	к								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0,9999	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,9985	0,9994	0,9998	0,9999	1	1	1	1	1
3	0,9907	0,9955	0,9979	0,9991	0,9996	0,9998	0,9999	1	1
4	0,9699	0,9834	0,9912	0,9955	0,9977	0,9989	0,9995	0,9998	0,9999
5	0,9312	0,958	0,9752	0,9858	0,9921	0,9958	0,9978	0,9989	0,9994
6	0,8734	0,9161	0,9462	0,9665	0,9797	0,9881	0,9932	0,9962	0,9979
7	0,7991	0,8576	0,9022	0,9347	0,9576	0,9733	0,9835	0,9901	0,9942
8	0,7133	0,7851	0,8436	0,8893	0,9238	0,9489	0,9665	0,9786	0,9867
9	0,6219	0,7029	0,7729	0,8311	0,8775	0,9134	0,9403	0,9597	0,9735
10	0,5304	0,616	0,6939	0,7622	0,8197	0,8666	0,9036	0,9319	0,9529
11	0,4433	0,5289	0,6108	0,686	0,7626	0,8095	0,8566	0,8944	0,9238
12	0,3626	0,4457	0,5276	0,6063	0,679	0,744	0,8001	0,8472	0,8856
13	0,2933	0,369	0,4478	0,5265	0,6023	0,6728	0,7362	0,7916	0,8386
14	0,233	0,3007	0,3738	0,4497	0,5255	0,5987	0,6671	0,7291	0,7837
15	0,1825	0,2414	0,3074	0,3782	0,4514	0,5246	0,5955	0,662	0,7226
16	0,1411	0,1912	0,2491	0,3134	0,3821	0,453	0,5238	0,5925	0,6573
17	0,1079	0,1496	0,1993	0,2562	0,3189	0,3856	0,4544	0,5231	0,5899
18	0,0816	0,1157	0,1575	0,2068	0,2627	0,3239	0,3888	0,4557	0,5224
19	0,0611	0,0885	0,1231	0,1649	0,2137	0,2687	0,3285	0,3918	0,4568
20	0,0453	0,0671	0,0952	0,1301	0,1719	0,2202	0,2742	0,3328	0,3946
21	0,0334	0,0504	0,0729	0,1016	0,1368	0,1785	0,2263	0,2794	0,3368
22	0,0244	0,0375	0,0554	0,0786	0,1078	0,1432	0,1847	0,232	0,2843
23	0,0177	0,0277	0,0417	0,0603	0,0841	0,1137	0,1493	0,1906	0,2373
24	0,0127	0,0203	0,0311	0,0458	0,0651	0,0895	0,1194	0,155	0,1962
25	0,0091	0,0148	0,0231	0,0346	0,0499	0,0698	0,0947	0,1249	0,1605
26	0,0065	0,0107	0,017	0,0259	0,038	0,054	0,0745	0,0998	0,1302
27	0,0046	0,0077	0,0124	0,0193	0,0287	0,0415	0,0581	0,079	0,1047
28	0,0032	0,0055	0,009	0,0142	0,0216	0,0316	0,0449	0,0621	0,0834
29	0,0023	0,0039	0,0065	0,0104	0,0161	0,0239	0,0345	0,0484	0,066
30	0,0016	0,0028	0,0047	0,0076	0,0119	0,018	0,0263	0,0374	0,0518

Продовження табл. А.3

χ^2	к									
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,9997	0,9999	0,9999	1	1	1	1	1	1	1
6	0,9989	0,9994	0,9997	0,9999	0,9999	1	1	1	1	1
7	0,9967	0,9981	0,999	0,9995	0,9997	0,9999	0,9999	1	1	1
8	0,9919	0,9951	0,9972	0,9984	0,9991	0,9995	0,9997	0,9999	0,9999	1
9	0,9829	0,9892	0,9933	0,996	0,9976	0,9986	0,9992	0,9995	0,9997	0,9999
10	0,9682	0,9789	0,9863	0,9913	0,9945	0,9967	0,998	0,9988	0,9993	0,9996
11	0,9462	0,9628	0,9747	0,9832	0,989	0,9929	0,9955	0,9972	0,9983	0,999
12	0,9161	0,9396	0,9574	0,9705	0,9799	0,9866	0,9912	0,9943	0,9964	0,9977
13	0,8774	0,9086	0,9332	0,952	0,9661	0,9765	0,984	0,9892	0,9929	0,9954
14	0,8305	0,8696	0,9015	0,9269	0,9466	0,9617	0,973	0,9813	0,9872	0,9914
15	0,7764	0,823	0,8622	0,8946	0,9208	0,9414	0,9573	0,9694	0,9784	0,985
16	0,7166	0,7696	0,8159	0,8553	0,8881	0,9148	0,9362	0,9529	0,9658	0,9755
17	0,653	0,7111	0,7634	0,8093	0,8487	0,8818	0,9091	0,9311	0,9486	0,9622
18	0,5874	0,649	0,706	0,7575	0,803	0,8424	0,8758	0,9035	0,9261	0,9443
19	0,5218	0,5851	0,6453	0,7012	0,752	0,7971	0,8364	0,87	0,8981	0,9213
20	0,4579	0,5213	0,583	0,6419	0,6968	0,7468	0,7916	0,8308	0,8645	0,8929
21	0,3971	0,4589	0,5207	0,5811	0,6387	0,6926	0,742	0,7863	0,8253	0,8591
22	0,3405	0,3995	0,4599	0,5203	0,5793	0,6357	0,6887	0,7374	0,7813	0,8202
23	0,2888	0,344	0,4017	0,4608	0,5198	0,5776	0,6329	0,685	0,733	0,7765
24	0,2424	0,2931	0,3472	0,4038	0,4616	0,5194	0,576	0,6303	0,6715	0,7289
25	0,2014	0,2472	0,2971	0,3503	0,4058	0,4624	0,519	0,5745	0,6278	0,6782
26	0,1658	0,2064	0,2517	0,3009	0,3532	0,4076	0,4631	0,5186	0,573	0,6255
27	0,1353	0,1709	0,2112	0,256	0,3045	0,3559	0,4093	0,4638	0,5182	0,5717
28	0,1094	0,1402	0,1757	0,2158	0,26	0,3079	0,3585	0,411	0,4644	0,5179
29	0,0878	0,114	0,1449	0,1803	0,2201	0,2639	0,3111	0,3609	0,4125	0,4651
30	0,0699	0,092	0,1185	0,1494	0,1848	0,2243	0,2676	0,3142	0,3632	0,414

Таблиця А.4 - Значення af(t) для розподілу закона Вейбулла

t/a	b											
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	3	4
0,1	0,6714	1,0696	1,1724	1,0821	0,9048	0,7109	0,5356	0,3919	0,2808	0,198	0,03	0,004
0,2	0,3511	0,6213	0,7805	0,8376	0,8187	0,7524	0,6621	0,5645	0,47	0,3843	0,119	0,319
0,3	0,2388	0,4441	0,5976	0,6949	0,7408	0,7451	0,7186	0,6716	0,6127	0,5484	0,2628	0,1071
0,4	0,1811	0,3466	0,4861	0,5943	0,6703	0,7161	0,7354	0,733	0,7136	0,6817	0,4502	0,2495
0,5	0,1458	0,2841	0,4093	0,5174	0,6065	0,676	0,7264	0,759	0,7758	0,7788	0,6619	0,4697
0,6	0,122	0,2405	0,3526	0,4559	0,5488	0,6303	0,6998	0,7572	0,8028	0,8372	0,8702	0,759
0,7	0,1048	0,2082	0,3087	0,4051	0,4966	0,5823	0,6617	0,7341	0,7995	0,8577	1,0432	1,0791
0,8	0,0919	0,1832	0,2736	0,3624	0,4493	0,534	0,616	0,6951	0,7711	0,8437	0,1506	0,3597
0,9	0,0817	0,1634	0,2448	0,3259	0,4066	0,4868	0,5664	0,6453	0,7234	0,8007	0,1722	0,513
1	0,0736	0,1472	0,2207	0,2943	0,3679	0,4415	0,515	0,5886	0,6622	0,7358	0,1036	0,4715
1,1	0,0669	0,1337	0,2003	0,2668	0,3329	0,3986	0,4639	0,5286	0,5927	0,656	0,9591	0,2314
1,2	0,0613	0,1223	0,1823	0,2425	0,3012	0,3585	0,4132	0,468	0,5195	0,5686	0,7674	0,8691
1,3	0,0565	0,1125	0,1676	0,2211	0,2725	0,3213	0,367	0,4089	0,4467	0,4798	0,5635	0,5052
1,4	0,0524	0,1041	0,1543	0,202	0,2466	0,2871	0,3228	0,353	0,377	0,3944	0,3782	0,2355
1,5	0,0489	0,0967	0,1425	0,185	0,2231	0,2558	0,2821	0,3012	0,3127	0,3162	0,231	0,855
1,6	0,0458	0,0903	0,132	0,1697	0,2019	0,2273	0,245	0,2543	0,255	0,2474	0,1278	0,0233
1,7	0,043	0,0845	0,1227	0,156	0,1827	0,2015	0,2116	0,2125	0,2046	0,189	0,0637	0,0046
1,8	0,0406	0,0793	0,1143	0,1436	0,1653	0,1782	0,1817	0,1758	0,1616	0,141	0,0285	—
1,9	0,0384	0,0747	0,1067	0,1323	0,1496	0,1573	0,1552	0,1441	0,1257	0,1028	0,0114	—
2	0,0364	0,0705	0,0999	0,1221	0,1353	0,1386	0,132	0,117	0,0963	0,0733	0,004	—
2,1	0,0346	0,0667	0,0936	0,1128	0,1225	0,1218	0,1117	0,0942	0,0728	0,0511	0,0013	—
2,2	0,033	0,0633	0,0879	0,1044	0,1108	0,1069	0,0941	0,0752	0,0542	0,0348	—	—
2,3	0,0315	0,0601	0,0827	0,0966	0,1003	0,0937	0,0789	0,0595	0,0398	0,0232	—	—
2,4	0,0302	0,0572	0,0779	0,0896	0,0907	0,0819	0,0659	0,0467	0,0288	0,0151	—	—
2,5	0,0289	0,0545	0,0735	0,0831	0,0821	0,0716	0,0548	0,0364	0,0206	0,0097	—	—

Таблиця А.5 – Значення квантилів нормального розподілу залежно від імовірності безвідмовної роботи

Нормальний розподіл				Розподіл Вейбулла				
Квантиль, P	Імовірність безвідмовної роботи, *P* (t)	Квантиль, P	Імовірність безвідмовної роботи, *P* (t)	Параметр форми, *m*	*1/m*	b_m	C_m	Коефіцієнт варіації, ν
0,000	0,5000	—2,054	0,98	0,400	2,5	3,32	10,4	3,14
—0,1	0,5398	—2,1	0,9821	0,417	2,4	2,98	8,74	2,93
—0,126	0,55	—2,170	0,985	0,435	2,3	2,68	7,38	2,75
—0,2	0,5793	—2,2	0,9861	0,455	2,2	2,42	6,22	2,57
—0,253	0,60	—2,3	0,9893	0,476	2,1	2,20	5,27	2,40
—0,3	0,6179	—2,326	0,99	0,500	2,0	2,00	4,47	2,24
—0,385	0,65	—2,4	0,9918	0,526	1,9	1,83	3,81	2,08
—0,4	0,6554	—2,409	0,992	0,556	1,8	1,68	3,26	1,94
—0,5	0,6915	—2,5	0,9938	0,588	1,7	1,54	2,78	1,80
—0,524	0,70	—2,576	0,995	0,625	1,6	1,43	2,39	1,67
—0,6	0,7257	—2,6	0,9953	0,667	1,5	1,33	2,06	0,55
—0,674	0,75	—2,652	0,996	0,714	1,4	1,24	0,78	0,43
—0,7	0,7580	—2,7	0,9965	0,769	1,3	1,17	0,54	0,32
—0,8	0,7881	—2,748	0,997	0,833	1,2	1,10	0,33	0,21
—0,842	0,80	—2,8	0,9974	0,909	1,1	1,05	0,15	0,10
—0,9	0,8159	—2,878	0,998	1,0	1,0	1,00	1,00	1,00
—1,0	0,8413	—2,9	0,9981	1,1	0,909	0,965	0,878	0,910
—1,036	0,85	—3,0	0,9986	1,2	0,833	0,941	0,787	0,837
—1,1	0,8643	—3,090	0,999	1,3	0,769	0,924	0,716	0,775
—1,2	0,8849	—3,291	0,9995	1,4	0,714	0,911	0,659	0,723
—1,282	0,90	—3,5	0,9998	1,5	0,667	0,903	0,615	0,681
—1,3	0,9032	—3,719	0,9999	1,6	0,625	0,897	0,574	0,640
—1,4	0,9192			1,7	0,588	0,892	0,540	0,605
-1,5	0,9332			1,8	0,556	0,889	0,512	0,575
—1,6	0,9452			1,9	0,526	0,887	0,485	0,547
—1,645	0,95			2,0	0,500	0,886	0,463	0,523
—1,7	0,9554			2,1	0,476	0,886	0,439	0,496
—1,751	0,96			2,2	0,455	0,886	0,425	0,480
—1,8	0,9641			2,3	0,435	0,886	0,409	0,461
—1,881	0,97			2,4	0,417	0,887	0,394	0,444
—2,0	0,9772			2,5	0,400	0,887	0,380	0,428

Навчальне видання
Методичні вказівки
до практичних занять
з дисципліни “Надійність приладів”
для студентів спеціальності 015.13

Склали: ПОДРИГАЛО Михайло Абович
ПОЛЯНСЬКИЙ Олександр Сергійович
АБРАМОВ Дмитрій Володимирович

Відповідальний за випуск Б.В. Савченков

Редактор

План 2019

Підп. до друку Формат 60×80 1/16 Папір №1
Друк офсетний Умов. друк. арк. 1,8 Обл.- вид. арк. 2,6
Заказ № Тираж 50 прим.

ХНАДУ, Харків, 61002, вул. Ярослава Мудрого, 25

Надруковано видавництвом Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Віддруковано видавництвом
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Укладачі: ПОДРИГАЛО Михайло Абович
ПОЛЯНСЬКИЙ Олександр Сергійович
АБРАМОВ Дмитрій Володимирович

Кафедра технології машинобудування і ремонту машин