

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 1

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
для проведення практичних занять
з вибіркової навчальної дисципліни

«НАДІЙНІСТЬ, ДІАГНОСТИКА ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ
КОНТРОЛЬ»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «магістр»

Рекомендовано на засіданні
кафедри метрології та
інформаційно-виміральної
техніки
26 серпня 2024 р.,
протокол № 8

Розробники: к.т.н., доцент кафедри метрології та інформаційно-виміральної
техніки ЧЕПЮК Ларіна, асистент кафедри метрології та інформаційно-
виміральної техніки ВОРОНОВА Тетяна

Житомир 2024

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 2

Методичні рекомендації до практичних занять з вибіркової навчальної дисципліни «Надійність, діагностика та автоматизований контроль» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «магістр». Укладачі Л.О. Чепюк Т.С. Воронова. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2024. – 75 с.

Укладачі: Л.О. Чепюк, Т.С. Воронова

Рецензенти:

д.т.н., доцент, професор кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Кирилович В.А.

к.т.н., доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Гуменюк А.А

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 3

ЗМІСТ

Практична робота № 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ І СИСТЕМ. 4

Практична робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НЕ РЕЗЕРВОВАНИХ НЕ ВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПО СТАТИСТИЧНИМ ДАНИМ ПРО ВІДМОВИ ВИРОБІВ. 10

Практична робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НЕ РЕЗЕРВОВАНИХ ВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПО СТАТИСТИЧНИМ ДАНИМ ПРО ВІДМОВИ ВИРОБІВ. 18

Практична робота № 4

РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ПО ЗАДАНИЙ СХЕМІ ТА ЗАДАНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. 22

Практична робота № 5

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ НЕРЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПО ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ СХЕМІ. 26

Практична робота № 6

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗАГАЛЬНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ БЕЗ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ. 37

Практична робота № 7

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗАГАЛЬНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ З ОБМЕЖЕНИМ ТА НЕОБМЕЖЕНИМ ВІДНОВЛЕННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ. 45

Практична робота № 8

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ. 50

Додатки

52

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 4

Практична робота № 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ І СИСТЕМ.

Теоретичні відомості

Ймовірність безвідмовної роботи за статистичними даними про відмови оцінюється виразом

$$P \cdot (t) = \frac{n(t)}{N} \quad (1.1)$$

де $n(t)$ – число виробів, які не відмовили до моменту часу t ;

N – число виробів, поставлених на випробування;

$P \cdot (t)$ – статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи виробів.

Для ймовірності відмови за статистичними даними справедливо співвідношення

$$q \cdot (t) = \frac{n - N(t)}{N} \quad (1.2)$$

де $n - N(t)$ – число виробів, які відмовили до моменту часу t ;

$q \cdot (t)$ – статистична оцінка ймовірності відмови виробів.

Частота відмов за статистичними даними про відмови визначається виразом

$$f \cdot (t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} \quad (1.3)$$

$f \cdot (t)$ – статистична оцінка частоти відмов виробів;

Δt – інтервал часу.

Інтенсивність відмов за статистичними даними про відмови визначається формулою

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 5

$$\lambda \cdot (t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} \quad (1.4)$$

де $n(t)$ – число виробів, які не відмовили до моменту часу t ;

$\Delta n(t)$ – число відмов виробів на ділянці часу $(t, t+\Delta t)$;

$\Delta t \cdot n(t)$ – статистична оцінка інтенсивності відмов виробів.

Середній час безвідмовної роботи виробиза статистичними даними оцінюється виразом

$$m_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.5)$$

де t_i – час безвідмовної роботи i – го виробу;

N – загальне число виробів, поставлених на випробування;

m – статистична оцінка середнього часу безвідмовної роботи виробу.

Для визначення m_t за формулою (1.5) необхідно знати моменти виходу з ладу всіх N виробів. Можна визначати m_t з рівняння

$$m_t \approx \sum_{i=1}^m n_i t_{cp i} \quad (1.6)$$

де n_i – кількість поламаних виробів на інтервалі часу;

$$t_{cp i} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}; m = t_k / \Delta t; \Delta t = t_{i+1} - t_i$$

t_i –час початку i –го інтервалу; t_i – час кінця i –го інтервалу, t_k - час, протягом якого вийшли з ладу всі вироби; Δt – інтервал часу.

$$D_t = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (t_i - m_t)^2 \quad (1.7)$$

де D_t – статистична оцінка дисперсії часу безвідмовної роботи виробу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 6

Завдання

1. Випробування поставлено N однотипних електронних виробів. За t годин відмовило S виробів. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ та статистичну оцінку $q(t)$.

Табл.1.1

Варіант	N	$t, \text{годин}$	S
1	500	2000	50
2	600	2500	60
3	700	3000	55
4	800	3500	75
5	900	2000	65
6	1000	2500	70
7	1100	3000	80
8	1200	3500	75
9	1300	2000	70
10	1400	2500	85
11	1500	3000	80
12	1600	3500	75
13	1700	2000	90
14	1800	2500	85
15	1900	3000	75
16	2000	3500	90
17	2100	2000	80
18	2200	2500	75
19	2300	3000	85
20	2500	3000	70
21	1500	3000	80
22	1600	3500	75
23	1700	2000	90
24	1800	2500	85
25	1900	3000	75
26	2000	3500	90
27	2100	2000	80
28	2200	2500	75
29	2300	3000	85
30	2400	3500	90

Завдання 2. На випробування було поставлено N однотипних ламп. За перші 3000 годин відмовило m ламп, а за інтервал часу 3000 – 4000 годин відмовило ще l ламп. Потрібно визначити статистичну оцінку частоти та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 7

інтенсивності відмов електронних ламп в проміжку часу 3000 – 4000 год.

Табл.2.2

Варіант	N	m	l
1	2500	50	20
2	2600	60	30
3	2700	55	20
4	2800	75	25
5	2900	65	35
6	1000	40	30
7	1100	45	20
8	1200	35	25
9	1300	40	20
10	1400	45	25
11	1500	40	20
12	1600	45	25
13	1700	50	30
14	1800	55	35
15	1900	45	25
16	2000	50	20
17	2100	80	30
18	2200	55	25
19	2300	65	35
20	2400	50	30

Завдання 3. На випробування поставлено N виробів. За час t год відмовило p виробів, тобто $n(t) = 400 - 200 = 200$. За інтервал часу $(t, t + \Delta t)$, де $\Delta t = 100$ годину, відмовило p виробів, тобто $\Delta n(t) = 100$. Потрібно визначити $P(t)$, $q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$.

Табл.2.3

Варіант	N	t , годин	p
1	400	3000	60
2	410	3500	50
3	420	2000	40
4	430	2500	45
5	440	3000	55
6	350	3500	40
7	360	2000	50
8	370	2500	45

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 8

9	380	3000	40
10	390	3500	25
11	400	2000	20
12	410	2500	25
13	420	3000	30
14	430	3500	35
15	440	2000	25
16	350	2500	20
17	360	3000	30
18	370	3500	25
19	380	2000	35
20	390	2500	30

Приклади рішення задач

Завдання 1. Випробування поставлено 1000 однотипних електронних ламп, за 3000 годин. Відмовило 80 ламп. Потрібно визначити $P(t)$, $q(t)$ при $t = 3000$ год. Рішення. В даному випадку $N = 1000$; $n(t) = 1000 - 80 = 920$; $N - n(t) = 1000 -$

$920 = 80$. Тому за (1.1) і (1.2) визначаємо

$$P(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{920}{1000} = 0,92;$$

$$q(3000) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08;$$

$$q(3000) = 1 - P(3000) = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Завдання 2. На випробування було поставлено 1000 однотипних ламп. За перші 3000 годин відмовило 80 ламп, а за інтервал часу 3000 – 4000 год. Відмовило ще 50 ламп. Потрібно визначити статистичну оцінку частоти та інтенсивності відмов електронних ламп в проміжку часу 3000 – 4000 год.

Рішення. В даному випадку $N = 1000$; $t = 3000$ год; $\Delta t = 1000$ годину; $\Delta n(t) = 50$; $n(t) = 920$.

За формулами (2.3) і (2.4) знаходимо

$$f(t) = f \cdot (3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} 1/\text{час};$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 9

$$\lambda(t) = \lambda \cdot (3000) = \frac{\Delta n(t)}{t \cdot n(t)} = \frac{100}{100 \cdot 200} = 5 \cdot 10^{-3} 1/\text{час};$$

Завдання 3. На випробування поставлено $N = 400$ виробів. За час $t = 3000$ год відмовило 200 виробів, тобто $n(t) = 400 - 200 = 200$. За інтервал часу $(t, t + \Delta t)$, де $\Delta t = 100$ годину, відмовило 100 виробів, т. Е. А $n(t) = 100$. Потрібно визначити $P(3000)$, $q(3100)$, $f(3000)$, $\lambda(3000)$.

Рішення. За формулою (1.1)

$$P(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{200}{400} = 0,5$$

$$P(3100) = \frac{n(t)}{N} = \frac{100}{400} = 0,25$$

Використовуючи формули (1.3) і (1.4), отримаємо

$$f(t) = f(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t} = \frac{100}{400 \cdot 100} = 2,5 \cdot 10^{-3} 1/\text{час}$$

$$\lambda(t) = \lambda(3000) = \frac{\Delta n(t)}{t n(t)} = \frac{100}{100 \cdot 200} = 5 \cdot 10^{-3} 1/\text{час}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 10

Практична робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НЕ РЕЗЕРВОВАНИХ НЕ ВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПО СТАТИСТИЧНИМ ДАНИМ ПРО ВІДМОВИ ВИРОБІВ

Теоретичні відомості

Випишемо формули, по яких визначатися кількісні характеристики надійності виробу

$$p(t) = \exp\left(-\int_0^t \gamma(t)dt\right) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (2.1)$$

$$q(t) = 1 - p(t) \quad (2.2)$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt} \quad (2.3)$$

$$\gamma(t) = \frac{f(t)}{p(t)} \quad (2.4)$$

$$m_t = \int_0^t p(t)dt \quad (2.5)$$

де $p(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи виробу на інтервалі часу від 0 до t ;

$q(t)$ – вірогідність відмови виробу на інтервалі часу від 0 до t ;

$f(t)$ – частота відмов виробу або щільність вірогідності часу безвідмовної роботи виробу T ;

$\gamma(t)$ – інтенсивність відмов виробу;

m_t – середній час безвідмовної роботи виробу.

Формули (2.1) - (2.5) для експоненціального закону розподілу часу без

$$p(t) = e^{-\gamma t} \quad (2.6)$$

$$q(t) = 1 - e^{-\gamma t} \quad (2.7)$$

$$f(t) = \gamma \cdot e^{-\gamma t} \quad (2.8)$$

$$\gamma(t) = \frac{\gamma \cdot e^{-\gamma t}}{e^{-\gamma t}} = \gamma \quad (2.9)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 11

Формули (2.1) - (2.5) для експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи виробу наберуть вигляду

$$p(t) = 0.5 - \Phi(U) \quad U = \frac{t - m}{\sigma} \quad (2.10)$$

$$q(t) = 0.5 + \Phi(U) \quad \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU \quad (2.11)$$

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t} \quad \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}} dU \quad (2.12)$$

$$\gamma(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t} \cdot \frac{1}{0.5 - \Phi(U)} \quad (2.13)$$

де $\Phi(U)$ – функція Лапласа, що має властивості

$$\Phi(U) = 0 \quad (2.15)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U) \quad (2.16)$$

$$\Phi(\infty) = 0,5 \quad (2.17)$$

Значення функції $\varphi(U)$ Лапласа приведені в додатку П. 7.13 [1].
Значення функції приведені в додатку П. 7.17 [1].

Тут m_t – середнє значення випадкової величини T ;
 σ^2 – дисперсія випадкової
величини T ; T – час безвідмовної
роботи;

Формули (2.1) – (2.5) для закону розподілу Вейбулла часу безвідмовної роботи виробу має вигляд

$$p(t) = e^{-at^k} \quad (2.18)$$

$$q(t) = 1 - e^{-at^k} \quad (2.19)$$

$$f(t) = akt^{k-1} \cdot p(t) \quad (2.20)$$

–

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \Gamma \cdot \left(\frac{1}{k}\right)}{a^{\frac{1}{k}}}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 12

де a, k – параметри закону розподілу Вейбулла.

$\Gamma(x)$ – гамма-функція, значення якої приведені в додатку П. 7.18 [1].

Формули (2.1) – (2.5) для закону розподілу Релея часу безвідмовної роботи виробу має вигляд

$$f(t) = \frac{t^2}{2\sigma_t^2} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right) \quad (2.21)$$

$$\gamma(t) = \frac{t^2}{2\sigma_t^2} \quad (2.22)$$

$$m(t) = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.23)$$

де σ_t – міра розподілу випадкової величини T ; T – час безвідмовної роботи виробу.

Завдання

1. Час роботи елементу повністю підпорядкований експериментальному закону розподілу з параметром γ (табл.2.1).

Необхідно вичислити кількісні характеристики надійності елементу $p(t)$, $q(t)$, $f(m)$, m_t , $t=1000$ час.

Табл.3.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
γ	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
γ	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9

2. Час роботи елементу повністю підпорядкований нормальному закону з параметрами m_t , σ_t (табл.2.2). Необхідно вичислити кількісні характеристики надійності $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(m)$, m_t , для $t = 1000$ годин.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 13

Табл.2.2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_t	4000	5000	6000	7000	8000	9000	6000	7000	8000	9000
σ_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m_t	5000	6500	7000	8500	9000	5500	6000	7500	8000	9500
σ_t	3000	3000	3000	3000	3000	4000	4000	4000	4000	4000
Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
m_t	5000	6000	7500	8000	9500	5000	6500	7000	8500	9000
σ_t	4000	4000	4000	4000	4000	3000	3000	3000	3000	3000

3. Час роботи виробу повністю підкоряється закону розподілу Релея. Потрібно вичислити кількісні характеристики надійності виробу $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(t)$, m_t , $t=1000$ година, якщо параметр розподілу σ_t (табл.3.2).

Табл.2.3

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ_t	3000	3000	3000	3000	3000	4000	4000	4000	4000	4000
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
σ_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

4. Час безвідмовної роботи виробу підкоряється закону Вейбулла з параметрами k , a (1/годин), а час роботи виробу t (годин) (табл.2.4). Потрібно вичислити кількісні характеристики виробу $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(t)$, m_t .

Табл.2.4

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
a	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
t	100	100	100	100	100	200	200	200	200	200
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
a	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
t	150	150	150	150	150	250	250	250	250	250
Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
k	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
a	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
t	125	125	125	125	125	175	175	175	175	175

Приклади рішення

Завдання 1. Час роботи елементу повністю підпорядкований експериментальному закону розподілу з параметром $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-5} 1/\text{година}$.

Необхідно вичислити кількісні характеристики надійності елементу $p(t)$,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 14

$q(t)$, $f(m)$, m_t , $t=1000$ час.

Рішення:

Використовуємо формули (2.6), (2.7), (2.8), (2.10), для $p(t)$, $q(t)$, $f(m)$, m_t .

1. Вичислимо вірогідність безвідмовної роботи $p(t) = e^{-\gamma t} = e^{-0.0025} = 0,9753$

Використовуючи ці таблиці П. 7.14 отримаємо

$$p(1000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0.0025} = 0,9753$$

2. Вичислимо вірогідність відмови $q(1000)$. Маємо

$$q(1000) = 1 - p(1000) = 0,0247$$

3. Вичислимо частоту відмов

$$f(t) = \gamma p(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t} \quad f(1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000}$$

4. Вичислимо середній час безвідмовної роботи

$$m_t = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ годин}$$

Завдання 2. Час роботи елемента повністю підпорядкований нормальному закону з параметрами $m_t = 8000$ годин, $\sigma_t = 2000$ годин. Необхідно вичислити кількісні характеристики надійності $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(m)$, m_t , для $t = 1000$ годин.

Рішення:

Скористаємося формулами (2.11), (2.12), (2.13), (2.14) для $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(m)$, m_t .

1. Вичислимо вірогідність безвідмовної роботи

$$p(t) = 0.5 - \Phi(U) \quad U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}$$

$$U = \frac{10000 - 8000}{2000} = 1 \quad \Phi(1) = 0,2420$$

$$P(10000) = 0,5 - 0,2420 = 0,2580$$

2. Визначимо частоту відмови $f(t)$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 15

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_t} \cdot \exp \cdot \left[\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right]$$

Введемо позначення

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}} \quad \varphi(-U) = \varphi(U)$$

Тоді

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t}; \quad U = \frac{(t - m_t)}{\sigma_t}$$

$$f(1000) = \frac{\varphi(1)}{2000} = \frac{0.242}{2000} = 12,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/годин}$$

3. Розрахуємо інтенсивність безвідмовної роботи елементу

$$\gamma(t) = \frac{f(t)}{p(t)}$$

$$\gamma(10000) = \frac{f(10000)}{p(10000)} = 12,1 \cdot \frac{10^{-5}}{0.1587} = 76,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/годин}$$

4. Середній час безвідмовної роботи елементу $m_t = 8000$ годин

Завдання 3. Час роботи виробу повністю підкоряється закону розподілу Релея. Потрібно вичислити кількісні характеристики надійності виробу $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(t)$, m_t , $t = 1000$ година, якщо параметр розподілу $\sigma_t = 1000$ години

Рішення:

Скористаємося формулами (2.18), (2.21), (2.22), (2.23) для $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(t)$, m_t

1. Вичислимо вірогідність безвідмовної роботи $p(t)$

$$p(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right)$$

$$p(1000) = \exp\left(-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}\right) = e^{-0.5} = 0,606$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 16

2. Визначимо частоту відмови $f(t)$

$$f(t) = \frac{t \cdot p(t)}{\sigma_t^2}$$

$$f(1000) = \frac{1000 \cdot 0.606}{1000^2} = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/годин}$$

σ

3. Розрахуємо інтенсивність відмов

$$\gamma(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}$$

$$\gamma(t) = \frac{1000}{1000^2} = 10^{-3} \text{ 1/годин}$$

4. Визначити середній час безвідмовної роботи виробу

$$m_t = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1000 \cdot 1,253 = 1253 \text{ годин}$$

Завдання 4. Час безвідмовної роботи виробу підкоряється закону Вейбулла з параметрами $k = 1,5$, $a = 10^{-4} \text{ 1/годин}$, а час роботи виробу $t = 100$ годин. Вимагається вичислити кількісні характеристики виробу $p(t)$, $\gamma(t)$, $f(t)$, m_t

Рішення

1. Визначимо вірогідність безвідмовної роботи $p(t)$ по формулі (2.18)

2. Маємо

$$p(t) = \exp(-at^k) \quad p(100) = \exp(10^{-4} \cdot 100^{1,5}); \quad x = 100^{1,5}$$

$$\lg x = 1,5 \lg 100 = 3; \quad x = 100; \quad p(100) = e^{-0,1} = 0,9048$$

3. Визначимо частоту відмов

$$\gamma(100) = \frac{f(100)}{p(100)} = 1,35 \cdot 10^{-3}$$

4. Визначимо середній час безвідмовної роботи виробу $m(t)$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 17

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \Gamma \cdot \left(\frac{1}{k}\right)}{a^{\frac{1}{k}}} = \frac{\frac{1}{1,5} \Gamma \cdot \left(\frac{1}{1,5}\right)}{10^{-4 \frac{1}{1,5}}} = \frac{0,666 \cdot \Gamma(0,666)}{10^{-2,666}}$$

Оскільки $z\Gamma(z) = \Gamma(z+1)$, то

$$m(t) = \frac{\Gamma(1,666)}{10^{-2,666}}$$

$$x = 10^{-2,666}; \quad \lg x = -2,666 \cdot \lg 10 = -2,666 = 3,333; \quad x = 0.00215$$

Використовуючи додатки П. 7.18 [1], отримаємо

$$m(t) = \frac{0,90167}{0,00215} = 426 \text{ годин}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 18

Практична робота №3

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НЕ РЕЗЕРВОВАНИХ ВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПО СТАТИСТИЧНИМ ДАНИМ ПРО ВІДМОВИ ВИРОБІВ

Теоретичні положення

До виробів, що відновлюються, відносяться такі елементи, які після відмов можуть бути відремонтовані для виконання своїх функцій. При цьому можливо, що відмови безперервно працюючої системи усуваються миттєво, кількість відновлення не обмежена, профілактика відмов відсутня. Якщо всі відмови є незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами, моменти відмов утворюють простий відновлення. Роботу відновлюваного елемента можна подати у вигляді інтервалів, що випадково чергуються Q_1 ; працездатності та відновлення (ремонт, простою) τ_{yi} . Вважаючи, що всі величини Q_1 і τ_{yi} є незалежними випадковими, можна визначити показники безвідмовності для інтервалів працездатності, показники відновлюваності для інтервалів ремонту (простою) та комплексні показники.

Можливість відновлення (закінчення ремонту)

$$V(t_0) = \frac{M(0) - M(t_0)}{M(0)}, \quad (3.1)$$

$M(0)$ - кількість об'єктів, що поставлені на відновлення;

Ймовірність невідновлення на заданому інтервалі де $M(t_0)$ - кількість відмов, що залишилися не відновленими на момент часу t_0 .

$$V(t_0) = \frac{M(t_0)}{M(0)}. \quad (3.2)$$

Щільність розподілу часу відновлення

$$g(t) = \frac{\Delta m(t, \Delta t)}{M(0)\Delta t}, \quad (3.3)$$

где $\Delta m(t, \Delta t)$ - кількість об'єктів, ремонт яких закінчено в інтервалі часу Δt , починаючи з часу t .

Інтенсивність відновлення

$$\mu(t) = \frac{\Delta m(t, \Delta t)}{M(t)\Delta t}, \quad (3.4)$$

где $M(t)$ - число об'єктів, відновлених на час t .

Середній час відновлення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 19

$$\tau = \frac{1}{M(0)} \sum_{i=1}^{M(0)} r_i, \quad (3.5)$$

де r_i - поточний час відновлення.
Комплексні показники надійності.
Коефіцієнт готовності

$$K_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \tau}, \quad (3.6)$$

де T - середній час напрацювання на відмову.
Коефіцієнт простою

$$K_n = \frac{\bar{\tau}}{\bar{T} + \bar{\tau}}, \quad (3.7)$$

де τ - среднее время восстановления

Завдання

1. За час роботи автонавантажувача сталося 4 відмови. Час відновлення становило відповідно $\tau_1=10$, $\tau_2=20$, $\tau_3=18$, $\tau_4=13$ год. Визначити середній час відновлення автонавантажувача. Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1:

$$\tau = \frac{10+20+18+13}{4} = 15,2 \text{ ч.}$$

2. Прилад має середнє безвідмовної роботи $T=80$ год. та середній час відновлення $\tau=2$ год. Визначити коефіцієнт готовності K_r , коефіцієнт простою K_n . Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1:

$$K_r = \frac{80}{80+2} = 0,976;$$

$$K_n = \frac{2}{80+2} = 0,024.$$

3. Інтенсивність відмов автонавантажувача дорівнює $\lambda = 0,02$ 1/год, а середній час відновлення $\tau = 10$ год. Визначити коефіцієнт готовності. Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1):

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ ч};$$

$$K_r = \frac{50}{50+10} = 0,83.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 20

4. Середній час безвідмовної роботи плавучого крана дорівнює 230 год, середній час відновлення – 12 год. Визначити коефіцієнт готовності. Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1.

5. Інтенсивність відмов пристрою, що відновлюється, дорівнює $\lambda=0,025$ 1/год. Середній час відновлення $\tau = 160$ год. Визначити ймовірність того, що в момент часу $t=20$ год пристрій буде в справному стані. Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1. При вирішенні необхідно користуватися додатком 2:

$$P(20) = \exp(-0,025 \cdot 20) = 0,9750;$$

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ ч.};$$

$$K_r = \frac{40}{40 + 160} = 0,2.$$

6. Коефіцієнт готовності відновлюваного пристрою $K_r = 0,8$, а середній час відновлення $\tau = 200$ год. Визначити коефіцієнт готовності та ймовірність того, що в момент часу $t = 20$ год пристрій буде в справному стані. Чисельні значення для інших варіантів наведено в табл. 3.1. При вирішенні необхідно користуватися додатком 2:

$$K_r = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \tau};$$

$$0,8 = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + 200}, \quad 0,8\bar{T} + 0,8 \cdot 200 = \bar{T};$$

$$T = \frac{32}{0,2} = 160 \text{ ч}$$

$$P(20) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\bar{T}}} = e^{-\frac{20}{160}} = e^{-0,125} = \exp(-0,125) = 0,88.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015									Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024		
	Випуск 1			Зміни 0			Екземпляр № 1			Арк 75 / 21		

Таблиця 3.1

Вар.	1				2		3		4		5			6		
	τ_1 , год.	τ_2 , год.	τ_3 , год.	τ_4 , год.	T , год.	τ , год.	λ	τ , год.	T , год.	τ , год.	λ	τ_1 , год.	t , год.	Кг	τ , год.	t , год.
1	10	20	18	13	80	2	0.02	10	230	12	0.025	160	20	0.80	200	20
2	25	32	33	42	100	4	0.04	30	450	20	0.015	200	20	0.74	400	55
3	28	30	35	40	90	3	0.03	20	300	10	0.020	100	20	0.70	300	35
4	30	35	40	48	110	5	0.05	40	470	80	0.030	300	30	0.58	500	65
5	40	40	48	50	120	6	0.06	50	500	50	0.037	350	30	0.29	600	75
6	50	55	60	65	130	10	0.07	60	580	120	0.042	350	40	0.65	700	85
7	60	62	66	68	140	20	0.08	70	600	20	0.025	400	20	0.95	800	95
8	70	72	74	78	150	30	0.09	80	250	50	0.034	400	50	0.88	900	95
9	80	30	40	20	160	40	0.1	90	350	100	0.033	500	70	0.67	1000	85
10	90	28	15	14	170	50	0.02	80	510	90	0.015	500	80	0.71	900	75
11	100	90	80	70	180	60	0.03	70	470	40	0.010	600	100	0.82	800	65
12	120	60	50	30	190	70	0.04	60	310	30	0.025	600	200	0.79	700	35
13	12	20	18	15	70	3	0.02	20	230	14	0.025	170	40	0.80	300	25
14	25	34	33	43	100	4	0.03	40	450	30	0.015	200	20	0.74	400	55
15	28	30	35	40	90	3	0.03	20	300	10	0.020	100	20	0.70	300	35
16	30	35	40	48	110	5	0.05	40	470	80	0.030	300	30	0.58	500	65
17	40	40	48	50	120	6	0.06	50	500	50	0.037	350	30	0.29	600	75
18	50	55	60	65	130	10	0.07	60	580	120	0.042	350	40	0.65	700	85
19	65	62	66	68	140	25	0.08	70	600	20	0.025	400	20	0.95	800	95
20	75	72	74	78	150	30	0.09	80	250	50	0.034	400	50	0.88	900	95
21	85	30	40	20	160	40	0.1	90	350	100	0.033	500	70	0.67	1000	85
22	95	28	15	14	175	50	0.02	80	510	90	0.015	500	80	0.71	900	75
23	110	90	80	70	185	60	0.03	70	470	40	0.010	600	100	0.82	800	65
24	125	60	50	30	195	70	0.08	60	310	30	0.025	600	200	0.79	700	35
25	45	32	33	42	105	4	0.07	30	450	20	0.015	200	120	0.76	300	50
26	28	38	35	44	95	3	0.03	20	300	10	0.025	150	20	0.70	300	30
27	30	35	40	48	115	15	0.03	45	470	90	0.030	300	50	0.58	500	65
28	40	40	48	50	125	6	0.06	50	520	50	0.037	350	30	0.29	600	70
29	50	52	60	65	135	10	0.07	60	580	120	0.042	350	40	0.65	700	85
30	60	62	62	68	140	20	0.08	70	600	20	0.025	400	20	0.95	800	95

Контрольні питання

1. Що таке виріб, що відновлюється, дайте графік його роботи.
2. Дайте визначення та формулу для ймовірності відновлення щільності розподілу часу відновлення та інтенсивності відновлення.
3. Дайте визначення комплексних показників надійності: коефіцієнта готовності, середнього напрацювання на відмову, середнього часу відновлення та коефіцієнта простою.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 22

Практична робота №4

РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ПО ЗАДАНИЙ СХЕМІ ТА ЗАДАНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

При розрахунку надійності технічного пристрою по раптовим відмовам визначають такі показники: ймовірність безвідмовної роботи за заданий час $P(t)$, інтенсивність відмов $\lambda_i(t)$, параметр потоку відмов $\Lambda(t)$ напрацювання до відмови T_0 .

Розрахунок проводиться при таких допущеннях:

- 1) кожний елемент та пристрій в цілому знаходяться в одному з двох можливих станів: працездатному або непрацездатному;
- 2) відмови елементів є подіями випадковими і незалежними;
- 3) інтенсивність відмов елементів є величина постійна, тобто не залежить від часу;
- 4) середній час напрацювання до відмови елементів розподілений по експоненційному закону.

Порядок проведення розрахунку такий:

- 1) складають на основі електричної схеми пристрою логічну схему надійності;
- 2) визначають кількість груп однотипних елементів, що входять в пристрій, та кількість елементів в кожній групі;
- 3) визначають електричний режим роботи кожного елемента з врахуванням умов роботи пристрою;
- 4) визначають критерій відмови пристрою.

Розрахунок параметра загального потоку відмов пристрою проводиться за формулою:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i,$$

де n – загальна кількість груп однотипних елементів, що входять до складу пристрою. Однотипними вважаються однорідні елементи з приблизно однаковими коефіцієнтами електричного навантаження.

N_i – число елементів i -ї групи;

λ_i – інтенсивність відмов елементів i -ї групи.

Інтенсивність відмов елементів i -ї групи λ_i , в робочому режимі визначається за формулою:

$$\lambda_i = a_{1i} a_{2i} \lambda_{0i},$$

де a_{1i} – корегуючий коефіцієнт, який враховує умови роботи (кліматичні та механічні дії) в залежності від призначення та умов експлуатації пристрою;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 23

$a_{2i} = f(\kappa_n, t^o)$ – корегуючий коефіцієнт, який враховує електричне навантаження елементів та температуру зовнішнього середовища;

λ_{oi} – інтенсивність відмов елементів (комплектуючих виробів) в нормальних умовах (при температурі зовнішнього середовища $25 \pm 5^\circ\text{C}$, відносній вологості 30-70% та атмосферному тиску 620...795 мм рт. ст., без механічних дій).

Коефіцієнт a_{1i} визначається за формулою:

$$a_{1i} = \prod_{i=1}^n \kappa_i,$$

де κ_i – корегуючі коефіцієнти, значення яких приведені в таблицях в додатку 5; n – кількість коефіцієнтів.

Температура у середині пристрою визначається для найгірших умов за формулою:

$$t = t_{оточ.мах} + \theta,$$

де $t_{оточ.мах}$ – максимальна температура зовнішнього середовища;

θ – температура перегріву у середині пристрою по відношенню до зовнішнього середовища.

Значення температури зовнішнього середовища для кожного варіанта завдання слід визначати згідно з варіантом його кліматичного виконання та кліматичної категорії.

Значення інтенсивності відмов елементів λ_{oi} , наведені в додатку 4, значення корегуючих коефіцієнтів a_1 та $a_2 = f(\kappa_n, t^o)$ наведені в додатку 5, формули розрахунку коефіцієнта електричного навантаження κ_n приведені в додатку 6 цієї методички.

Інтенсивність відмов інтегральних мікросхем залежить від їх електричного навантаження. Для цифрових (логічних) мікросхем навантаження в свою чергу залежить від фактичного коефіцієнта розмноження по виходах мікросхеми тобто від кількості мікросхем підключених до даної мікросхеми. Для аналогових мікросхем навантаження залежить від вибраного режиму роботи. При розробці пристроїв проектувальник розраховує режим роботи мікросхеми і відповідно розраховує коефіцієнт навантаження. З метою спрощення розрахунку інтенсивності відмов інтегральних мікросхем вважати, що коефіцієнт електричного навантаження цифрових мікросхем дорівнює 0,6, а аналогових – 0,8.

По знайденому значенню параметра потоку відмов Λ визначають ймовірність безвідмовної роботи пристрою для заданого часу t за формулою:

$$P(t) = e^{-\Lambda t}.$$

Напрацювання на відмову визначають за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda}.$$

Результати розрахунку рекомендується оформити у вигляді табл. 4.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 24

Таблиця 4.1

№ з/п	Тип елемента	Кількість, шт	Параметри режиму роботи елемента		фіцієнт навантаж	$i \cdot 10^6$ од ⁻¹	λ 1i	z_i	$\lambda_{0i} n_i a_{1i} a_{2i}$
			по ТУ	фактично					
1	КТ315	1	$P_k = 150$ мВт	$P_\phi = 120$ мВт	0,8	0,3	,4	,9	,92
2	КД520	1	$I_{пр} = 20$ мА	$I_{пр \phi} = 12$ мА	0,6	0,05	,4	,4	,068
3	МЛТ	1	$P_m = 125$ мВт	$P_\phi = 75$ мВт	0,6	0,005	,4	,7	,012
4	К50-8	1	$U_m = 10$ В	$U_\phi = 5$ В	0,5	0,08	,4	,5	,136

Завдання

Розрахувати показники надійності технічного пристрою за раптовими відмовами по заданій в додатку 2 електричній схемі. Значення параметрів елементів (комплектуючих виробів), напруги джерела живлення та параметри електричного режиму активних елементів наведені на електричних схемах.

Варіанти завдання та умови експлуатації пристроїв наведені в табл.4.2.

Типи елементів для кожного пристрою вибирати самостійно з врахуванням електричного режиму роботи та заданої кліматичної категорії виконання пристрою.

При розрахунку визначити такі показники надійності пристрою:

- параметр потоку відмов $\lambda(t)$;
- напрацювання до відмови T_0 ;
- ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ з врахуванням найгіршого температурного режиму роботи пристрою на протязі часу $t = 5000$ год.

Побудувати графік функції безвідмовної роботи $P(t)$ за час напрацювання від 0 до $2T_0$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 25

Таблиця 4.2

Варі- ант	Схема пристрою	Кліматична категорія виконання	Умови експлуатації	Температура перегріву в середині пристрою, °С
1	Рис. д2.3	У	Лабораторія	15
2	Рис. д2.2	ХЛ	Стаціонар Приміщення 5	15
3	Рис. д2.1	ТВ	Поле	25
4	Рис. д2.7	ТС	Автомобіль	30
5	Рис. д2.6	У	Лабораторія	15
6	Рис. д2.9	ХЛ	Стаціонар Приміщення 2	30
7	Рис. д2.19	ТВ	Автомобіль	40
8	Рис. д2.4	ТС	Поле	30
9	Рис. д2.15	Т	Автомобіль	40
10	Рис. д2.8	О	Лабораторія	50
11	Рис. д2.10	У	Стаціонар Приміщення 5	40
12	Рис. д2.12	ХЛ	Лабораторія	35
13	Рис. д2.16	ТВ	Автомобіль	40
14	Рис. д2.11	ТС	Стаціонар Приміщення 2	30
15	Рис. д2.5	У	Поле	10
16	Рис. д2.13	ХЛ	Лабораторія	25
17	Рис. д2.21	ТС	Лабораторія	35
18	Рис. д2.26	ТС	Стаціонар Приміщення 2	20
19	Рис. д2.20	Т	Поле	10
20	Рис. д2.24	О	Корабель	30
21	Рис. д2.28	ХЛ	Приміщення 5	30
22	Рис. д2.18	ХЛ	Автомобіль	45
23	Рис. д2.14	У	Літак	30
24	Рис. д2.25	М	Корабель	30
25	Рис. д2.29	ТМ	Корабель	40
26	Рис. д2.30	ТВ	Автомобіль	50
27	Рис. д2.27	Т	Літак	25
28	Рис. д2.22	ОМ	Корабель	40
29	Рис. д2.23	У	Поле	10
30	Рис. д2.17	У	Автомобіль	30

Примітка. При виконанні завдання можна замість схеми пристрою, рисунок якої вказано в таблиці варіантів (Табл. № 2), взяти схеми пристрою, який Вами розраховувався в курсовому проекті з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” (згідно з методичними вказівками “Підсилювач двоканальний” та “Стабілізатор напруги імпульсний”). Типи елементів, їх номінали і електричне навантаження в цьому випадку беруть з розрахункової частини курсового проекту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 26

Практична робота №5

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ НЕРЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПО ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ СХЕМІ.

Мета роботи: Ознайомитися з методами розрахунку структурної надійності систем. Навчитися визначати надійність систем із послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів.

Теоретичні відомості

Система – сукупність взаємодіючих елементів, призначених для самостійного виконання заданих функцій.

Елемент – найпростіша складова частина системи.

Технічна система складається із декількох окремих елементів, кожен з яких має різний рівень надійності. Від сполучення цих надійностей залежить загальний рівень надійності системи в цілому. Для розрахунку імовірності безвідмовної роботи системи необхідно знати, до якого типу з'єднання (з точки зору теорії надійності) належить комбінація її елементів – до послідовного чи паралельного.

Системою із послідовним з'єднанням елементів (рис. 5.1) називається система, у якій відмовлення будь-якого елемента викликає відмовлення всієї системи. Наприклад, електричну машину зазвичай розглядають як пристрій із послідовно з'єднаних елементів, оскільки відмовлення в роботі будь-якого з них завжди пов'язане із зупинкою машини.

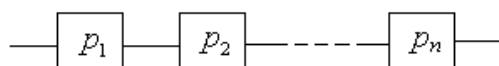


Рис. 5.1. Система із послідовним з'єднанням елементів

У системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання t необхідно і достатньо, щоб кожен з її n елементів працював безвідмовно протягом цього напрацювання. У подальшому для спрощення замість $P(t), Q(t)$ використаємо скорочений запис P, Q . Вважаючи відмовлення елементів незалежними, імовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення імовірностей: імовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку імовірностей цих подій

$$P = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (5.1)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 27

Із формули (5.1) очевидно, що надійність послідовної системи виявляється тим нижчою, чим більша кількість елементів (наприклад, при $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 0,95$ і $n=10$ маємо $P = 0,60$, при $n=15$ $P = 0,46$, а при $n = 20$ $P = 0,36$). Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині виразу (5.1) не перевищують одиниці, імовірність безвідмовної роботи такої системи не може перевищувати імовірність безвідмовної роботи найменш надійного з її елементів (принцип "гірше гіршого").

Системою із паралельним з'єднанням елементів (рис. 5.2) називається система, відмовлення якої відбувається тільки у випадку відмовлення всіх її елементів. Такі схеми надійності характерні для технічних систем, у яких елементи резервуються, тобто паралельне з'єднання використовується як метод підвищення надійності. Проте такі системи зустрічаються і самостійно (наприклад, системи двигунів чотиримоторного літака чи паралельне включення діодів у потужних випрямлячах).

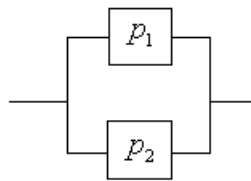


Рис. 5.2. Система із паралельним з'єднанням елементів

Для відмовлення системи із паралельним з'єднанням елементів протягом напрацювання t необхідно і достатньо, щоб усі її елементи відмовили протягом цього напрацювання. Таким чином відмовлення системи полягає в спільному відмовленні всіх елементів, імовірність чого (при допущенні незалежності відмовлень) може бути знайдена за теоремою множення імовірностей як добуток імовірностей відмовлення елементів:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (5.2)$$

Відповідно, імовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (5.3)$$

тобто, надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні числа елементів (наприклад, при $p_n = 0,9$ и $n = 2$ $P = 0,99$, а при $n = 3$ $P = 0,999$).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 28

Оскільки $q_i < 1$, добуток у правій частині (5.3) завжди менше кожного зі співмножників, тобто імовірність відмовлення системи не може бути вищою імовірності відмовлення найбільш надійного її елемента ("краще кращого") і навіть з порівняно ненадійних елементів можлива побудова цілком надійної системи.

Систему типу " m з n " можна розглядати як варіант системи із паралельним з'єднанням елементів, відмовлення якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менше ніж m елементів ($m < n$).

На рис. 5.3 представлена система "2 з 5", що працездатна, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири чи всі п'ять (на схемі пунктиром обведені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 зроблено умовно, насправді всі п'ять елементів рівнозначні). Системи типу " m з n " найчастіше зустрічаються в електричних і зв'язкових системах (при цьому елементами виступають сполучні канали), технологічних лініях, а також при структурному резервуванні.

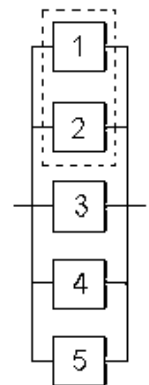


Рис. 6.3. Система "2 з 5"

Розрахунок надійності системи " m з n " може здійснюватись комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілу підкоряється дискретна випадкова величина k – кількість появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досліді імовірність появи події складає p . При цьому імовірність появи події рівно k разів визначається

$$P_k = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}, \quad (5.4)$$

де C_n^k - біноміальний коефіцієнт, називаний "числом сполучень по k з n " (тобто скількома різними способами можна реалізувати ситуацію " k з n ");

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (5.5)$$

Оскільки для відмовлення системи " m з n " достатньо, щоб кількість справних елементів була меншою за m , імовірність відмовлення може бути знайдена за теоремою додавання імовірностей для $k = 0, 1, \dots, (m-1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}. \quad (5.6)$$

Аналогічним чином можна знайти імовірність безвідмовної роботи як суму (6.8) для

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 29

$k=m, m+1, \dots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (5.7)$$

Очевидно, що $Q+P=1$, тому в розрахунках варто вибирати ту з формул (5.6), (5.7), що у даному конкретному випадку містить меншу кількість доданків.

Для системи "2 з 5" (рис. 5.3) за формулою (5.7) одержимо:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (5.8)$$

Імовірність відмовлення тієї ж системи за (6.6):

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5, \quad (5.9)$$

що, як видно, дає той же результат для імовірності безвідмовної роботи.

У табл. 5.1 приведені формули для розрахунку імовірності роботи систем типу "m з n" при $m < n \leq 5$.

Таблиця 5.1

m	Загальна кількість елементів, n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	-	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	-	-	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	-	-	-	p^4	$5p^4 - 4p^5$

Місткова структура (рис. 5.4) не зводиться до паралельного чи послідовного типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюжків елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних гілок (елемент 3 на рис. 5.4, а, елементи 3 і 6 на рис. 5.4, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, що відмовили, але і їхнім положенням у структурній схемі. Наприклад, працездатність технічної системи, схема якої наведена на рис. 5.4, а, буде втрачена при одночасному відмовленні елементів 1 і 2, чи 4 і 5, чи 1,3 і 5 чи 2, 3 і 4. У той же час відмовлення елементів 1 і 5, чи 2 і 4, чи 1, 3 і 4, чи 2, 3 і 5 не викличе відмовлення системи.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 30

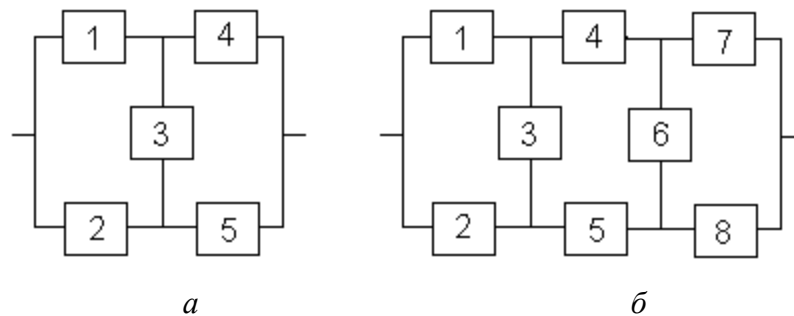


Рис. 5.4. Місткові схеми

Для аналізу надійності місткової схеми можна скористатися методом розкладання щодо особливого елемента, заснованим на відомій у математичній логіці теоремі про розкладання функції логіки по будь-якому аргументу. Відповідно до неї, можна записати:

$$P = p_i P|_{p_i=1} + q_i P|_{p_i=0}, \quad (5.10)$$

де p_i і $q_i = 1 - p_i$ – імовірності безвідмовної роботи і відмовлення i -го елемента; $P|_{p_i=1}$ і $P|_{p_i=0}$ – імовірності працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний і що i -й елемент відмовив.

Для місткової схеми (рис. 5.4, а) як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3. При $p_3 = 1$ місткова схема перетворюється в паралельно - послідовне з'єднання (рис. 5.5, а), а при $p_3 = 0$ – у послідовно - паралельне (рис. 5.5, б).

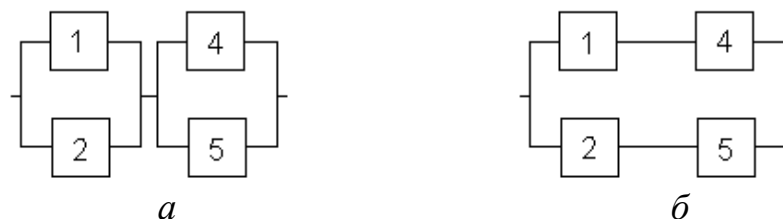


Рис. 5.5. Перетворення місткової схеми при абсолютно надійному (а) та такому, що відмовив (б) центральному елементі

Для перетворених схем можна записати:

$$P|_{p_i=1} = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)], \quad (5.11)$$

$$P|_{p_i=0} = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \quad (5.12)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 31

Тоді на підставі формули (6.10) одержимо:

$$P = p_3[1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3)[1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)] \quad (5.13)$$

Цим методом можна скористатися і при розкладанні щодо декількох "особливих" елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j) вираз (6.10) набуде вигляду:

$$P = p_i p_j P\bigg|_{\substack{p_i=1 \\ p_j=1}} + p_i q_j P\bigg|_{\substack{p_i=1 \\ p_j=0}} + q_i p_j P\bigg|_{\substack{p_i=0 \\ p_j=1}} + q_i q_j P\bigg|_{\substack{p_i=0 \\ p_j=0}} \quad (5.14)$$

Імовірність безвідмовної роботи місткової схеми (рис. 5.4, б) при розкладанні щодо діагональних елементів 3 і 6 за (5.14) визначиться:

$$P = p_3 p_6 P\bigg|_{\substack{p_3=1 \\ p_6=1}} + p_3 q_6 P\bigg|_{\substack{p_3=1 \\ p_6=0}} + q_3 p_6 P\bigg|_{\substack{p_3=0 \\ p_6=1}} + q_3 q_6 P\bigg|_{\substack{p_3=0 \\ p_6=0}} \quad (5.15)$$

Більшість реальних технічних систем має складну **комбіновану структуру**, частину елементів якої утворить послідовне з'єднання, іншу частину – паралельне, окремі гілки чи елементи структури гілки утворять місткові схеми чи схеми типу " m з n ". У цих випадках доцільно попередньо зробити декомпозицію системи, розбивши її на прості підсистеми – групи елементів, методика розрахунку надійності яких відома. Потім ці підсистеми в структурній схемі надійності замінюються квазіелементами з імовірностями безвідмовної роботи, рівними обчисленим імовірностям безвідмовної роботи цих підсистем. При необхідності таку процедуру можна виконати кілька разів поки квазіелементи, що залишилися, не утворять структуру, методика розрахунку надійності якої також відома.

Як приклад розглянемо комбіновану систему, представлену на рис. 5.6. Тут елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворять один з одним послідовні з'єднання. Замінімо їх відповідно квазіелементами А, В, С, D, для яких розрахунок надійності елементарно виконується за формулою 5.1. Елементи 15, 16, 17 і 18 утворять паралельне з'єднання, а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 - систему "3 з 5". Відповідні квазіелементи позначимо Е і F. У результаті перетворена схема набуде вигляду, показаного на рис. 5.7, а. У ній у свою чергу елементи А, В, С, D, F утворять місткову схему, що замінюється квазіелементом G. Схема, отримана після таких перетворень (рис. 5.10, б), утворить послідовне з'єднання елементів 1, G, Е, 19, для яких справедливе співвідношення 5.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 32

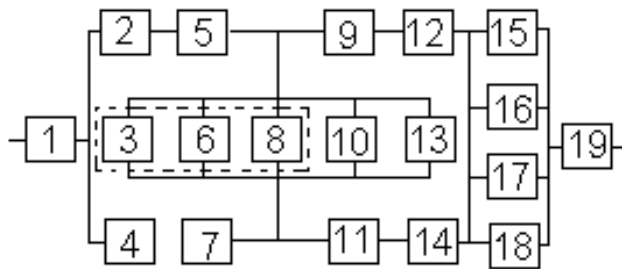


Рис. 5.6. Вихідна схема

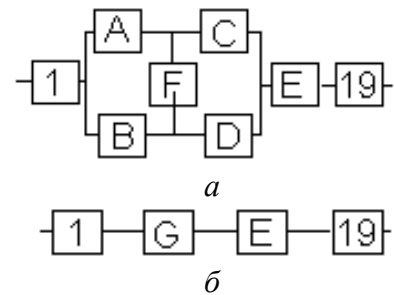


Рис. 5.7. Перетворені схеми

Завдання

За структурною схемою надійності електромеханічної системи, відповідно до варіанту завдання, побудувати залежність імовірності безвідмовної роботи системи від часу напрацювання в діапазоні зниження імовірності до рівня 0,1 – 0,2.

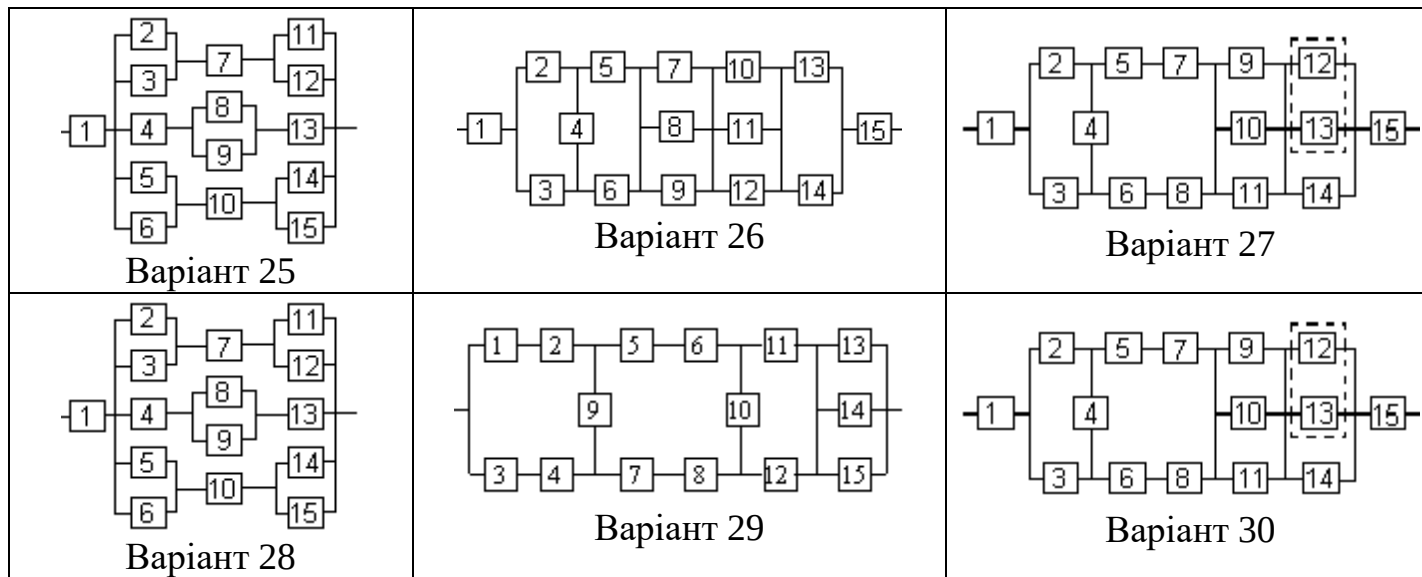
Усі елементи системи працюють у режимі нормальної експлуатації. Значення інтенсивності відмовлень елементів системи наведені у табл. 5.2.

Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Варіант 4	Варіант 5	Варіант 6
Варіант 7	Варіант 8	Варіант 9

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 33

Варіант 10	Варіант 11	Варіант 12
Варіант 13	Варіант 14	Варіант 15
Варіант 16	Варіант 17	Варіант 18
Варіант 19	Варіант 20	Варіант 21
Варіант 22	Варіант 23	Варіант 24

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 34



Таблиця 5.2

Вихідні дані

№ вар.	Інтенсивності відмовлень елементів, $\lambda_i \times 10^{-6}$, год ⁻¹															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0,1	1,0				0,5		1,0				0,1				
2	0,2	0,5							1,0					0,1		
3	0,1	1,0				2,0		1,0				5,0			0,2	
4	0,05	1,0				0,5				0,2				0,02		
5	0,1	0,5				1,0		0,5				1,0		0,1	-	
6	0,05	0,2	0,5										0,2		0,1	
7	0,01	1,0												0,1	-	
8	0,01	0,1	10,0				0,2		10,0				0,5		-	
9	0,01	1,0	5,0					0,2		5,0				0,1	-	
10	0,1	5,0	0,5	5,0	1,0	3,0	1,0	5,0	0,5	5,0			-			
№ вар.	Інтенсивності відмовлень елементів, $\lambda_i \times 10^{-6}$, год ⁻¹															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
11	0,1	1,0	2,0	1,0	5,0				3,0			1,0		0,05		
12	0,1	5,0	1,0	5,0	10,0			5,0			1,0			0,2		
13	0,1	10,0				20,0						10,0				
14	1,0				0,2	0,5	1,0	0,5	1,0				0,1			
15	0,1	1,0				0,5			2,0	0,5	0,2	1,0				
16	1,0	2,0	3,0	5,0				2,0	5,0				1,0			
17	1,0	2,0	4,0	2,0			4,0	5,0				1,0				
18	2,0	1,0	2,0	1,0	5,0	2,0	5,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	
19	5,0	20,0				50,0				30,0				1,0		
20	1,0	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0			5,0			0,2	0,5			

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015						Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0		Екземпляр № 1			Арк 75 / 35

Продовження таблиці 5.2

21	6,0	3,0	6,0	3,0	6,0	20,0	10,0
22	2,0			1,0			0,6
23	10,0			30,0			5,0 2,0
24	3,0		2,0	1,0	2,0	3,0	2,0
25	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	5,0	
26	0,1	1,0	2,0	1,0	5,0	0,2	
27	0,05	1,0			0,5		0,2 0,02
28	0,1	0,5		1,0	0,5		1,0 0,1 -
29	2,0	1,0	2,0	1,0	5,0	2,0	1,0 2,0 1,0 2,0 1,0
30	5,0		20,0		50,0		30,0 1,0

Порядок виконання роботи

1. Розбити вихідну систему на підсистеми, що являють собою послідовні, паралельні структури, схеми типу "m з n" або місткові схеми. Визначити імовірність безвідмовної роботи кожної підсистеми через імовірність безвідмовної роботи її складових елементів. Замінити ці підсистеми в структурній схемі надійності квазіелементами А, В, С і т.д. При необхідності процедуру повторювати до тих пір, поки квазіелементи, що залишилися, не утворюють просту структуру.

2. Виразити імовірність безвідмовної роботи системи через надійність квазіелементів.

3. Оскільки за умовою всі елементи системи працюють у період нормальної експлуатації, то імовірність безвідмовної роботи елементів з 1 по 14 (або 15) підкоряються експонентному закону:

$$p_i = e^{-\lambda_i t}.$$

Потрібно визначити імовірності безвідмовної роботи кожного з елементів для напрацювань, що вказані у табл. 6.3 та записати результати розрахунків у цю таблицю.

4. Розрахувати імовірності безвідмовної роботи квазіелементів для заданих напрацювань. Результати занести до табл. 5.3.

5. Визначити надійність системи для заданих напрацювань. Результати записати у табл. 5.3.

6. Побудувати графік зміни імовірності безвідмовної роботи системи від часу напрацювання в діапазоні зниження імовірності до рівня $P(t) = 0,1 \dots 0,2$, використавши результати розрахунків. Якщо мінімальний рівень надійності системи із табл. 5.3 вищий за потрібний, то необхідно доповнити таблицю розрахунками для декількох більших значень часу напрацювання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 36

Таблиця 5.3

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи системи

Елемент	$\lambda_i \times 10^{-6}$ год ⁻¹	Напрацювання $t \times 10^6$, годин							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0		
1									
2									
3									
...									
15									
A	-								
B	-								
C	-								
...	-								
P	-								

Контрольні запитання

1. Дати визначення поняттям «система» та «елемент». Навести приклади.
2. Послідовні та паралельні системи у теорії надійності. Приклади.
3. Як розраховується надійність систем із послідовним, паралельним та іншими типами з'єднання елементів?
4. Чи можна із ненадійних елементів отримати достатньо надійну систему?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 37

Практична робота №6

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗАГАЛЬНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ БЕЗ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Теоретичні відомості

Для розрахунку надійності технічної системи необхідно мати модель надійності системи, яка складається на основі функціональної (електричної) схеми системи. При цьому допускаються припущення, що:

- 1) кожний елемент та система в цілому можуть знаходитись в одному з двох станів: працездатному, або непрацездатному;
- 2) відмови елементів системи є подіями випадковими та неза-лежними;
- 3) одночасно два або більше елементів відмовити не можуть;
- 4) середнє напруцювання до відмови елементів системи роз-поділене по експонентному закону.

На логічних схемах, як правило, використовують три способи з'єднання елементів:

- послідовний;
- паралельний;
- послідовно-паралельний.

Послідовне з'єднання відповідає випадку, коли безвідмовна робота системи забезпечується при умові збереження працездатності усіма елементами послідовного з'єднання (див. рис.6.1,а).

При послідовному логічному з'єднанні ймовірність безвідмовної роботи системи за час t дорівнює:

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t) \cdots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

де $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента системи за час t ; n – кількість послідовно з'єднаних елементів системи.

Ймовірність безвідмовної роботи елемента системи за час t визначається експоненційною залежністю:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t},$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента, год⁻¹;

t - час роботи елемента.

Паралельне з'єднання відповідає випадку, коли відмова одного чи навіть декількох елементів не приводить до відмови системи в цілому. Показники надійності при паралельному з'єднанні на логічній схемі розраховуються за формулами з врахуванням режиму роботи резервних елементів.

При паралельному навантаженому з'єднанні елементів (див. рис. 6.1,б) ймовірність відмови системи дорівнює:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 38

$$Q_c(t) = q_1(t)q_2(t) \cdots q_k(t) = \prod_{j=1}^k q_j(t),$$

де $q_j(t)$ – ймовірність відмови j -го елемента за час t ,

k – кількість паралельно з'єднаних на логічній схемі елементів

Оскільки ймовірність відмови і ймовірність безвідмовної роботи зв'язані між собою співвідношенням:

$$q_j(t) = 1 - p_j(t),$$

то ймовірність відмови системи за час t дорівнює:

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k q_j(t) = \prod_{j=1}^k [1 - p_j(t)].$$

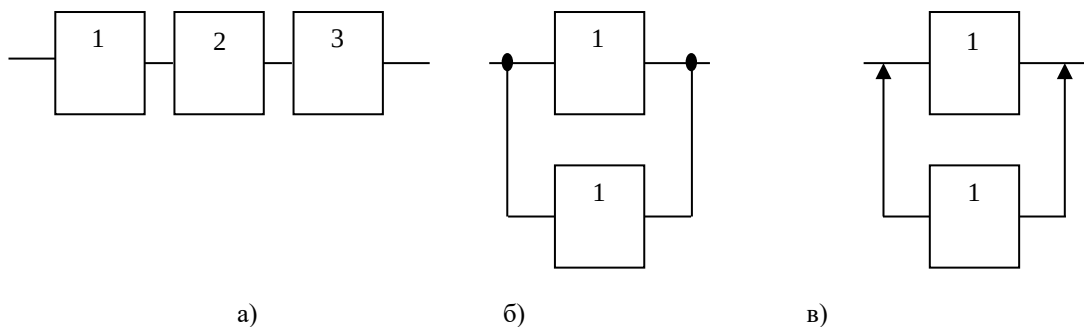


Рис. 6.1

Ймовірність безвідмовної роботи системи, складеної з паралельно з'єднаних навантажених елементів, дорівнює:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - p_j(t)].$$

У випадку рівно надійних елементів системи, з'єднаних паралельно:

$$P_c(t) = 1 - [1 - p(t)]^k.$$

Паралельне **ненавантажене** з'єднання відповідає випадку, коли при відмові основного елемента системи включається в роботу черговий резервний елемент і таким чином система зберігає свою працездатність.

При паралельному ненавантаженому з'єднанні елементів (див. рис.6.1,в) ймовірність безвідмовної роботи системи у випадку експоненційного розподілу напрацювання до відмови та рівно-надійних елементах дорівнює:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{j=0}^k \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!},$$

де λ_0 – інтенсивність відмов одного із k паралельно з'єднаних на логічній схемі надійності елементів.

В якості приклада розглянемо систему, логічна схема надійності якої показана на рис. 6.2.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 39

Вхідні дані цієї системи :

Інтенсивність відмов елементів дорівнює: $\lambda_1 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$;
 $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ і $\lambda_3 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$

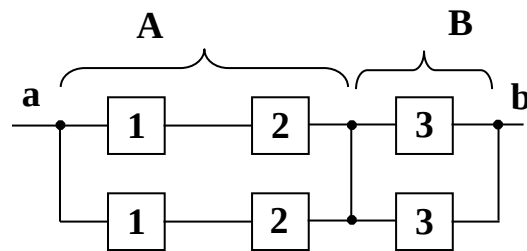


Рис. 6.2

Режим роботи резервних елементів – навантажений.

Потрібно оцінити виграш в надійності системи при вказаній схемі резервування за час $t = 100$ год.

Оцінку виграшу в ймовірності відмови резервованої системи за час t в порівнянні з основною зробити у формі відношення ймовірностей відмови основної та резервованої системи.

Завдання

Розрахувати ймовірність безвідмовної роботи технічної системи з резервуванням на протязі часу напрацювання t . Оцінити виграш в надійності резервованої системи в порівнянні з основною (нерезервованою) системою. Однотипні резервні елементи системи вважати рівно надійними.

Дані про інтенсивності відмов елементів системи, режими роботи резервних елементів, та номер рисунка логічної схеми наведені в табл. 6.1. Причому, таблиця 4 розділена на 3 підтаблиці, в заголовку яких вказано № рисунка (Рис. 6.3, 6.4, 6.5) та рядом з номером варіанта в дужках вказана літера (а,б,в,г,д,е,ж,з,л) номера схеми на цьому рисунку.

Таблиця 6.1

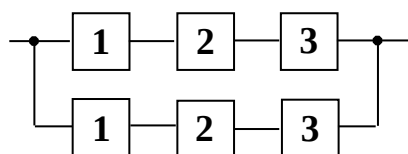
Параметр	Варіант (Рис.6.3)									
	1(а)	2(в)	3(д)	4(ж)	5(к)	6(б)	7(г)	8(е)	9(з)	10(л)
$\lambda_1 \cdot 10^5 \text{ год}^{-1}$	2	10	12	8	8	2	3	13	15	10
$\lambda_2 \cdot 10^5 \text{ год}^{-1}$	3	8	3	2	7	5	5	3	4	1
$\lambda_3 \cdot 10^5 \text{ год}^{-1}$	5	10	2	12	0,5	7	2	2	8	3
$t, \text{ год}$	100	200	300	400	500	500	100	300	500	300
Резерв	Навантажений					Ненавантажений				

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 40

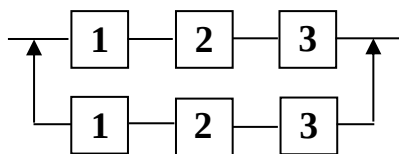
Параметр	Варіант (Рис. 6.4)									
	11(а)	12(в)	13(д)	14(ж)	15(к)	16(б)	17(г)	18(е)	19(з)	20(л)
$\lambda_1 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	0,1	9	1,2	9	6	2	8	7	6	0,3
$\lambda_2 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	0,2	5	2	2	2	3	4	8	0,8	5
$\lambda_3 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	2	1	0,1	7	1	9	1,5	2	8	0,7
t, год	400	300	500	200	100	150	500	100	200	300
Резерв	Навантажений					Ненавантажений				

Параметр	Варіант (Рис. 6.5)									
	21(а)	22(в)	23(д)	24(ж)	25(к)	26(б)	27(г)	28(е)	29(з)	30(л)
$\lambda_1 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	1,5	2	0,8	0,5	10	1,5	2	1	0,6	5
$\lambda_2 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	18	9	7	12	15	18	9	9	8	5
$\lambda_3 \cdot 10^5 \text{год}^{-1}$	1,2	10	9	25	18	1,2	10	8	22	7
t, год	400	300	500	200	100	150	500	100	200	300
Резерв	Навантажений					Ненавантажений				

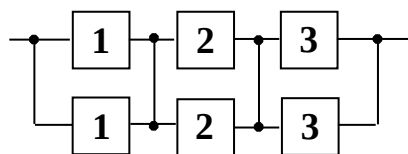
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 41



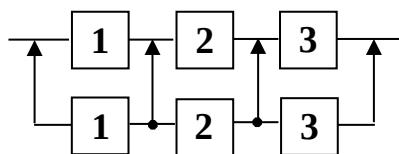
а)



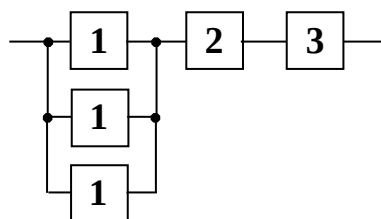
б)



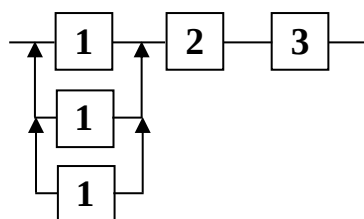
в)



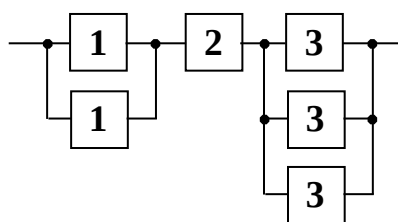
г)



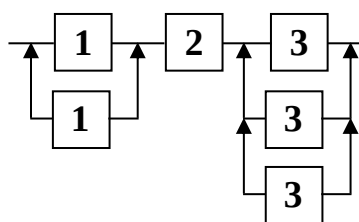
д)



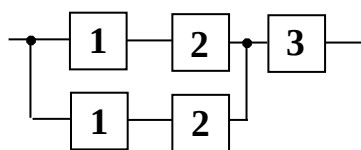
е)



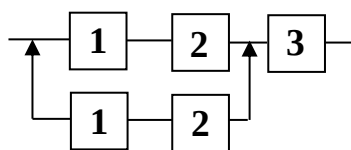
ж)



з)



к)



л)

Рис. 6.3

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 42

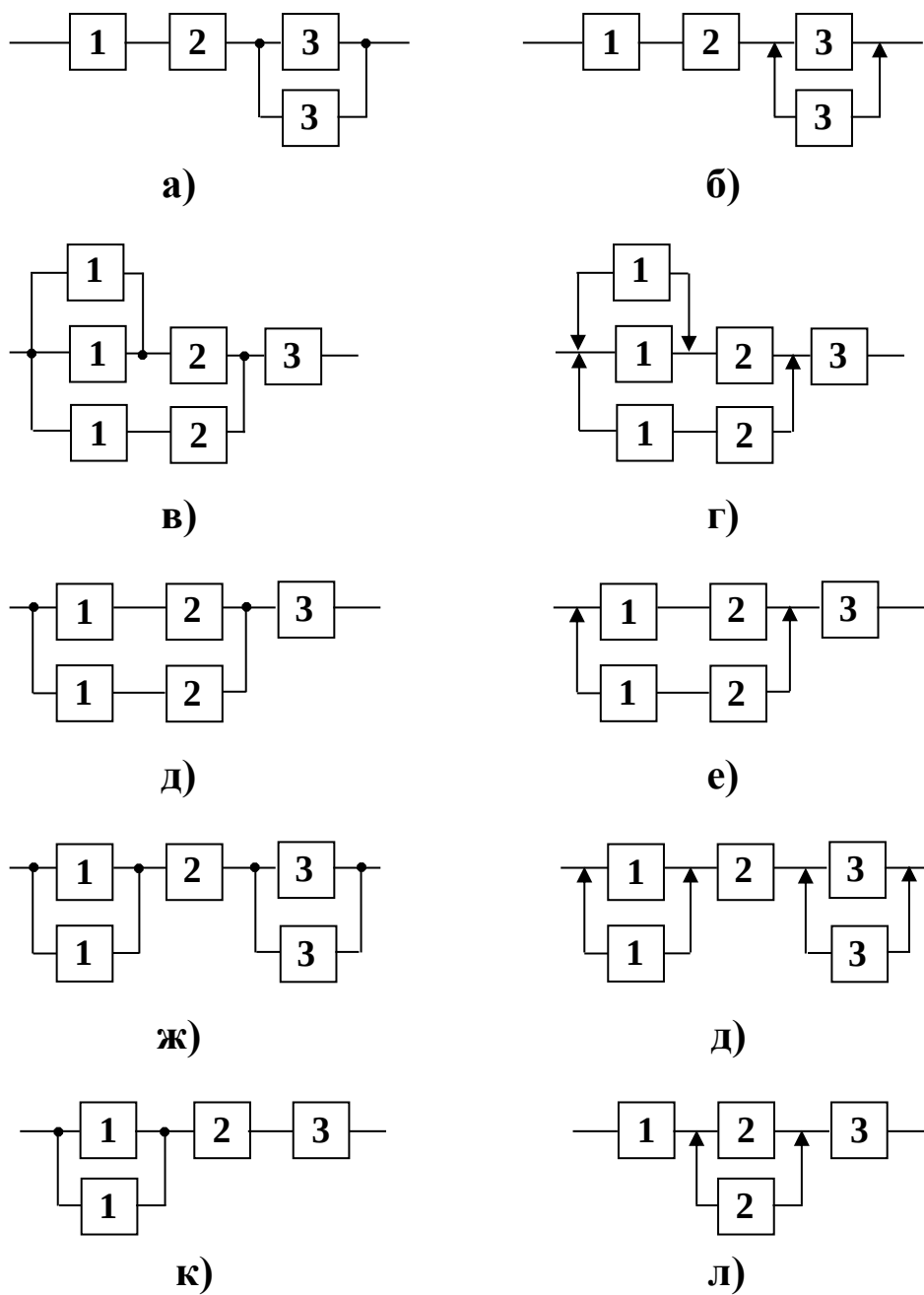


Рис. 6.4

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 43

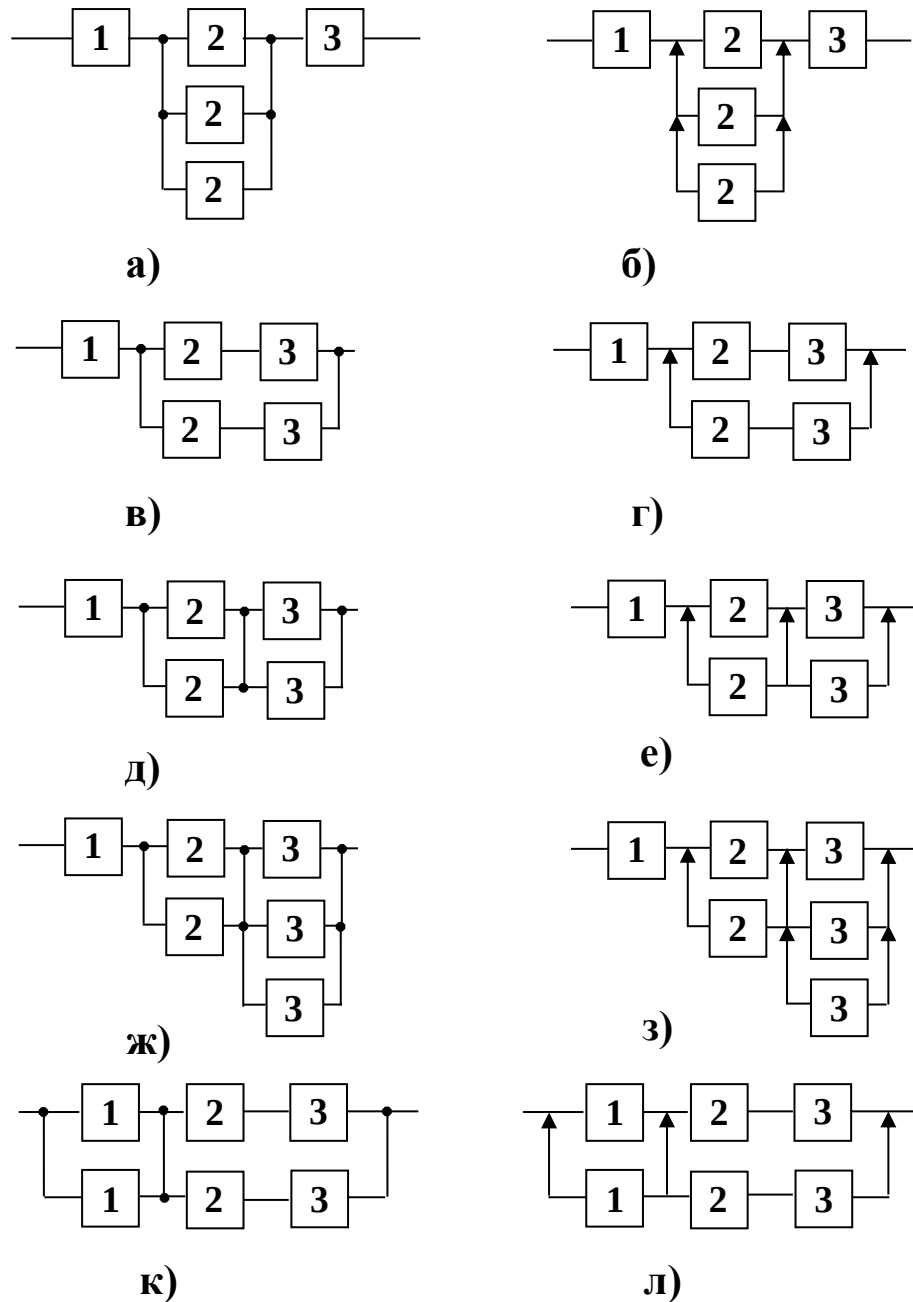


Рис.6.5

Приклад розв'язання

Критерієм відмови системи вважається розрив зв'язку між точками *a* і *b* в логічній схемі надійності.

Розрахунок надійності системи проводиться в такій послідовності:

1) поділимо логічну схему надійності системи на дві частини, як це показано на рис.6.2. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи кожної з цих частин;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 44

2) ймовірність безвідмовної роботи резервованої частини A , що складається з двох послідовно з'єднаних елементів 1 та 2, дорівнює:

$$P_A(t) = 1 - [1 - p_1(t) \cdot p_2(t)]^2.$$

3) ймовірність безвідмовної роботи резервованої частини B системи, що складається з паралельно з'єднаних елементів 3 визначається аналогічно:

$$P_B(t) = 1 - [1 - p_3(t)]^2.$$

4) ймовірність безвідмовної роботи системи в цілому за час t : буде:

$$P_{рез}(t) = P_A(t) \cdot P_B(t) = \{1 - [1 - p_1(t) \cdot p_2(t)]^2\} \cdot \{1 - [1 - p_3(t)]^2\}$$

Підставивши значення $P_1(t)$, $P_2(t)$ та $P_3(t)$ для часу $t = 100$ год у даний вираз, визначимо ймовірність безвідмовної резервованої системи за час $t = 100$ год:

$$P_{рез}(100) = [1 - (1 - e^{-2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 100})^2] [1 - (1 - e^{-7 \cdot 10^{-4} \cdot 100})^2] = 0,9948$$

5) для оцінки виграшу в ймовірності відмови за час $t = 100$ год. в порівнянні з основною системою необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи основної (нерезервованої) системи, тобто без врахування резервних елементів.

Оскільки в основній системі основні елементи з'єднані між собою послідовно, то ймовірність безвідмовної роботи системи за час t буде дорівнювати:

$$P_{осн}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t)$$

Підставивши значення $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ для часу $t = 100$ год, одержимо:

$$P_{осн}(100) = e^{-9,5 \cdot 10^{-4} \cdot 100} = 0,9094.$$

6) оцінку виграшу в ймовірності відмови резервованої системи за час $t = 100$ год. в порівнянні з основною системою визначимо по співвідношенню:

$$B = \frac{1 - P_{осн}(100)}{1 - P_{рез}(100)} = \frac{0,0906}{0,0052} = 17,42$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 45

Практична робота №7

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗАГАЛЬНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ З ОБМЕЖЕНИМ ТА НЕОБМЕЖЕНИМ ВІДНОВЛЕННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ

Теоретичні відомості

Показники надійності резервованих не відновлюваних та відновлюваних технічних систем (пристроїв), як правило, визначаються при умові, що в момент включення всі елементи системи працездатні.

Найбільш часто використовують два методи розрахунку надійності: метод інтегральних рівнянь та метод диференціальних рівнянь.

Метод інтегральних рівнянь базується на припущенні, що значення часу (напрацювання) між послідовними відмовами та часу відновлення системи є подіями випадковими і незалежними. При цьому методі складаються та розв'язуються інтегральні, або інтегро-диференціальні рівняння, які зв'язують ймовірність перебування технічної системи в різних станах.

В методі диференціальних рівнянь використовується припущення про показниковий розподіл часу (напрацювання) до відмов, або між відмовами і часом відновлення системи.

Спочатку перераховуються можливі стани системи, потім складається її математична модель у вигляді схеми станів, на якій кружками, або прямокутниками зображають можливі стани схеми, а стрілками - можливі напрямки переходів із одного стану в інший.

По схемі станів потім складають систему диференціальних рівнянь для ймовірності станів. Для цього використовують такі правила:

- 1) ліві частини рівнянь містять похідну по часу ймовірностей відповідних станів $P'_i(i)$, а кожний член правої частини рівнянь отримується шляхом помноження інтенсивності переходу, що стоїть над стрілкою, яка зв'язана з даним станом, на відповідну ймовірність стану;
- 2) знак залежить від напрямку стрілки (плюс, якщо стрілка направлена вістрям до стану і мінус – у протилежному випадку);
- 3) число рівнянь дорівнює числу станів;
- 4) система диференціальних рівнянь повинна бути доповнена умовою, що сума ймовірностей усіх станів дорівнює одиниці.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь за допомогою перетворень Лапласа або яким-небудь іншим методом дозволяє визначити необхідний показник надійності технічної системи.

Коли перерви в роботі системи допустимі, то в якості показника надійності, як правило, використовують коефіцієнт готовності K_2 .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 46

Якщо перерви в роботі системи неприпустимі, то в якості показника надійності використовують ймовірність $P(t)$ безперервної безвідмовної роботи на протязі часу t при умові, що в початковий момент часу всі елементи системи були працездатними.

Як приклад розглянемо технічну систему, логічна схема надійності якої показана на рис.7.1,а.

Технічна система складається з робочого та резервного блоків. Резервний блок знаходиться в навантаженому резерві. Є дві чергові ремонтні бригади, які обслуговують систему. Схема станів системи з відповідними інтенсивностями переходів показана на рис. 7.1,б.

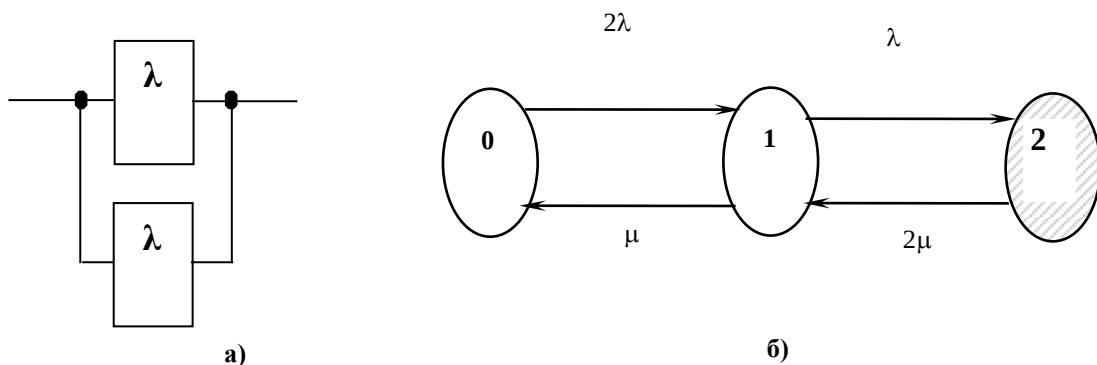


Рис. 7.1

Інтенсивність відмов та відновлення кожного блоку:
 $\lambda = 8 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$; $\mu = 0,2 \text{ год}^{-1}$. Визначити ймовірність застати систему в неробочому стані через 2 години після включення та значення коефіцієнта простою.

Завдання

Технічна система, яка має робочий та резервний блоки, розрахована на безперервну цілодобову роботу. Через t годин після включення дана система може одержати команду на переналад-ку режиму роботи. Інтенсивність відмов та відновлення робочого (основного) та резервного блоків дорівнює відповідно λ та μ . Для відновлення блоків системи задіяні n чергових ремонтних бригад.

Визначити ймовірність застати систему в непрацездатному стані через t годин після її включення, значення коефіцієнта готовності K_2 та коефіцієнта простою K_n .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 47

Таблиця 7.1

Параметр	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_1 \cdot 10^{-4}$, 1/год	8	12	15	5	8	10	12	14	10	24
μ , 1/год	0,2	0,3	0,5	0,2	0,5	0,2	0,4	0,5	0,2	0,3
t , год	36	54	84	120	150	72	54	112	300	96
Режим роботи резервного елемента	Навантажений					Ненавантажений				
Кількість ремонтних бригад, n	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2
Параметр	Варіант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\lambda_1 \cdot 10^{-4}$, 1/год	7	12	18	15	15	20	25	20	18	10
μ , 1/год	0,3	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	0,9	0,5	0,4	0,5
t , год	36	54	72	78	120	48	42	150	120	180
Режим, роботи резервного елемента	Навантажений					Ненавантажений				
Кількість ремонтних бригад, n	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1
Параметр	Варіант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\lambda_1 \cdot 10^{-5}$, 1/год	3	2	5	4	5	2	2	1,2	0,8	1,0
μ , 1/год	0,3	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	0,4	0,5	0,4	0,5
t , год	240	120	36	48	48	72	120	144	240	216
Режим, роботи резервного елемента	Навантажений					Ненавантажений				
Кількість ремонтних бригад, n	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1

Розв'язання

Технічна система в будь-який момент часу може знаходитись в одному з наступних станів:

- 0 – обидва блоки працездатні;
- 1 – один блок непрацездатний;
- 2 – обидва блоки непрацездатні.

Позначимо ймовірність цих станів через $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$.

Очевидно, що при знаходженні системи в стані 0 та 1 система працездатна, тобто функція готовності $K_z(t) = P_0(t) + P_1(t)$, а в стані 2 – система непрацездатна, тобто функція простою $K_n(t) = P_2(t)$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 48

При тривалій експлуатації системи може бути досягнений сталий режим, коли $K_z = P_0 + P_1$, $K_n = P_2$.

Система диференціальних рівнянь, складених по цій схемі, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t). \end{aligned} \right\}$$

Для визначення функції готовності системи розв'язок даної системи проводимо з врахуванням початкових умов, що при $t = 0$

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = P_2(0) = 0.$$

Дані рівняння доповнюємо нормувальною умовою:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1.$$

Розв'язок системи рівнянь проводимо з допомогою перетворень Лапласа (див. додаток 1), в результаті одержимо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} (s + 2\lambda)P_0(s) - \mu P_1(s) &= 1; \\ -2\lambda P_0(s) + (s + \lambda + \mu)P_1(s) - 2\mu P_2(s) &= 0; \\ -\lambda P_1(s) + (s + 2\mu)P_2(s) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Для одержання величини $P_i(s)$ використовуємо правило Крамера:

$$P_i(s) = \frac{D_i}{D},$$

де D – визначник, елементами якого є коефіцієнти при зображеннях $P_0(s), P_1(s), P_2(s)$, D_i – визначник, який утворюється з D шляхом заміни i -го стовпця коефіцієнтами правої частини системи.

Оскільки справному стану дубльованої системи відповідають стани 0 і 1, то згідно з теоремою додавання ймовірностей для несумісних подій, функція готовності дорівнює

$$K_z(t) = P_0(t) + P_1(t) = 1 - P_2(t).$$

Несправному стану системи відповідає стан 2 графа станів. Тому функція простою $K_n(t) = P_2(t)$. Таким чином, для визначення функцій готовності і простою достатньо знайти $P_2(t)$.

Для цього складемо визначники:

$$D = \begin{vmatrix} s + 2\lambda & -\mu & 0 \\ -2\lambda & (s + \lambda + \mu) & -2\mu \\ 0 & -\lambda & (s + 2\mu) \end{vmatrix} = s[s^2 + 3(\lambda + \mu)s + 2(\lambda + \mu)^2],$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} s + 2\lambda & -\mu & 1 \\ -2\lambda & (s + \lambda + \mu) & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 \end{vmatrix} = 2\lambda^2.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 49

Отже,

$$P_2(s) = \frac{2\lambda^2}{s[s^2 + 3(\lambda + \mu)s + 2(\lambda + \mu)^2]}.$$

Переходячи від зображення до оригіналу, одержуємо:

$$K_n(t) = P_2(t) = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} [1 + 2e^{-(\lambda + \mu)t} + e^{-2(\lambda + \mu)t}].$$

Коефіцієнт простою K_n визначається з виразу для $K_n(t)$ при $t \rightarrow \infty$

$$K_n = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2}.$$

Підставляючи числові значення для λ і μ , одержимо:

$$K_n \approx 1,5 \cdot 10^{-3}; \quad K_n(t)|_{t=2} \approx 2,63 \cdot 10^{-3}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 50

Практична робота №8

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Теоретичні відомості

При побудові графіка $\lambda^*(t)$ необхідно для кожного i -го проміжку напрацювання випробуваних виробів визначити значення статистичної оцінки інтенсивності відмов $\lambda_i^*(t)$ за формулою:

$$\lambda_i^*(t) = \frac{r_i}{n_{\text{сер}} \Delta t_i},$$

де r_i – кількість відмов виробів на проміжку часу Δt_i ;

$n_{\text{сер}} = \frac{n_i + n_{i+1}}{2}$ – середня кількість справно працюючих виробів на проміжку часу Δt_i .

При побудові графіка інтенсивності відмов $\lambda^*(t)$ на горизонтальній вісі послідовно відкладають проміжки часу Δt_i , і на кожному із них будують прямокутник з висотою λ_i^* .

Для побудови графіка статистичної функції надійності $p^*(t)$ визначають значення $p_i^*(t)$ за формулою:

$$p_i^*(t) = 1 - \frac{r_i}{N}$$

де r_i – кількість відмовлених виробів на інтервалі $[0, t_i]$ з N , що знаходились на випробуваннях.

Враховуючи, що в момент часу $t = 0$ функція надійності $p(0) = 1$ по визначеним значенням $p_i^*(t)$ для значень напрацювання t_i будують графік $p_i^*(t)$ у вигляді гістограми. Апроксимуючи ламану лінію графіку плавною кривою, отримуємо графік функції надійності $p(t)$.

Завдання

В результаті випробувань N транзисторів, які проводились без заміни відмовлених на протязі часу $t = 1000$ год., одержані дані про напрацювання до відмови, які наведені в табл.6.

Визначити значення та побудувати графік статистичної оцінки інтенсивності відмов транзисторів $\lambda^*(t)$, вирахувати значення та побудувати графік статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи транзисторів $p^*(t)$ для інтервалу часу $[0, t_m]$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015						Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024			
	Випуск 1	Зміни 0		Екземпляр № 1			Арк 75 / 51			

Таблиця 8.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інтервал Δt , год	Кількість відмов									
0-100	5	5	6	8	10	12	15	16	18	20
100-200	8	7	9	12	15	15	20	21	25	30
200-400	4	5	5	7	8	10	10	14	15	16
400-600	3	2	3	5	4	5	3	5	8	9
600-800	2	1	2	3	1	2	2	3	4	4
800-1000	1	2	3	2	3	3	1	2	3	2
N, шт.	100	120	150	200	250	300	350	400	450	500
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Інтервал Δt , год	Кількість відмов									
0-100	4	4	5	8	10	12	15	17	18	20
100-200	7	8	7	12	15	16	21	24	26	30
200-400	3	5	4	7	8	8	11	15	17	16
400-600	2	2	3	4	4	4	4	5	8	5
600-800	1	1	1	1	2	3	2	3	3	3
800-1000	1	2	1	2	1	1	2	2	4	2
N, шт.	100	120	150	200	250	300	350	400	450	500
Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Інтервал Δt , год	Кількість відмов									
0 - 240	6	5	5	7	12	12	15	17	18	20
240 - 480	12	8	7	12	15	16	21	24	26	30
480 - 720	7	10	4	8	8	10	14	15	17	16
720 - 960	4	5	3	4	4	5	7	8	8	6
960 - 1200	3	3	2	1	2	3	3	4	3	3
1200 - 1440	2	2	2	2	3	4	2	3	4	2
N, шт.	100	200	150	300	400	500	500	600	800	1000

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 52

Додаток 1
Довідкові матеріали до практичних занять.

Таблиця 1.
Функція e^{-x}

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	1,000	0,999	0,998	0,997	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991
0,0	1,000	0,990	0,980	0,970	0,961	0,951	0,942	0,932	0,923	0,914
0,1	0,905	0,896	0,887	0,878	0,869	0,861	0,852	0,844	0,835	0,827
0,2	0,819	0,811	0,802	0,795	0,787	0,779	0,771	0,763	0,756	0,748
0,3	0,741	0,733	0,726	0,719	0,712	0,705	0,698	0,691	0,684	0,677
0,4	0,670	0,664	0,657	0,651	0,644	0,638	0,631	0,625	0,619	0,613
0,5	0,606	0,600	0,594	0,589	0,583	0,577	0,571	0,566	0,560	0,554
0,6	0,540	0,543	0,538	0,533	0,527	0,522	0,517	0,512	0,507	0,502
0,7	0,497	0,492	0,487	0,482	0,477	0,472	0,468	0,463	0,458	0,454
0,8	0,449	0,445	0,440	0,436	0,432	0,427	0,423	0,419	0,415	0,411
0,9	0,407	0,403	0,398	0,395	0,391	0,387	0,383	0,379	0,375	0,372
1,	0,368	0,333	0,301	0,273	0,247	0,223	0,202	0,183	0,165	0,150
2,	0,135	0,122	0,111	0,100	0,091	0,082	0,074	0,067	0,061	0,055
3,	0,050	0,045	0,041	0,037	0,033	0,030	0,027	0,025	0,022	0,020
4,	0,018	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007
5,	0,0067	0,0061	0,0055	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,0027
6,	0,0025	0,0022	0,0020	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0010
				0 8	5 7	1 5	7 4	3 2	0 1	

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 53

Таблиця 2.
Функція $\ln 1/x$ (обернена до e^{-x})

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,999	0,0010	0,0009	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001
0,99	0,010	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001
0,9	0,105	0,094	0,083	0,073	0,062	0,051	0,041	0,030	0,020	0,010
0,8	0,223	0,211	0,198	0,186	0,174	0,162	0,151	0,139	0,128	0,117
0,7	0,357	0,342	0,329	0,314	0,301	0,288	0,274	0,261	0,248	0,236
0,6	0,512	0,494	0,478	0,462	0,446	0,431	0,416	0,400	0,386	0,371
0,5	0,693	0,673	0,654	0,635	0,616	0,598	0,580	0,562	0,545	0,528
0,4	0,916	0,892	0,867	0,844	0,821	0,798	0,777	0,755	0,734	0,713
0,3	1,204	1,171	1,139	1,109	1,079	1,050	1,022	0,994	0,968	0,942
0,2	1,609	1,561	1,514	1,470	1,427	1,386	1,347	1,309	1,273	1,238
0,1	2,303	2,207	2,120	2,040	1,966	1,897	1,833	1,772	1,715	1,661
0,0	∞	4,605	3,912	3,506	3,219	2,996	2,813	2,659	2,526	2,408
0,00	∞	6,908	6,215	5,809	5,521	5,298	5,116	4,962	4,828	4,711
0,000	∞	9,210	8,517	8,111	7,824	7,601	7,419	7,264	7,131	7,013

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 54

Таблиця 3

Функція та щільність нормального розподілу.

Функція нормального розподілу $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-u^2/2} du$					Щільність нормального розподілу $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$			
x	0,	1,	2,	3,	x	0,	1,	2,
,00	0,500	0,841	0,977	0,9 ² 8	,00	0,3	0,242	0,054
			3	65		99		0
,05	520	853	798	886	,05	398	230	488
,10	540	864	821	0,9 ³ 0	,10	397	218	440
			32		,15	395	206	396
,15	560	875	842	184	,20	391	194	355
,20	573	885	861	313	,25	387	183	317
,25	599	894	878	423	,30	381	171	283
,30	618	0,903	893	517	,35	375	160	252
		2			,40	368	150	224
,35	637	115	906	596	,45	361	140	198
,40	655	192	0,9 ² 1	663	,50	352	130	175
			80		,55	343	120	155
,45	674	265	286	720	,60	333	111	136
,50	692	332	379	767	,65	323	102	119
,55	709	394	461	807	,70	312	0,094	104
,60	726	452	534	841			1	
,65	742	505	598	869	,75	301	863	0,0 ² 9
,70	758	554	653	892				10
,75	773	599	702	912	,80	290	790	792
,80	788	641	745	0,9 ⁴ 2	,85	278	721	687
			77		,90	266	656	595
,85	802	678	781	409	,95	254	596	514
,90	816	713	813	519				
,95	829	744	841	609				

Примітка: 0,0^ka ; 0,9^ka – означає цифри відповідно 0,00...0a; 0,99...9a .
Наприклад 0,9⁴277 = 0,9999277

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 55

Перетворення Лапласа

Перетворення Лапласа ставить у відповідність кожній функції (оригіналу) $P(t)$ дійсної змінної t функцію (зображення) $p(s)$ ком-плексної змінної s по формулі

$$p(s) = \int_0^{\infty} P(t)e^{-st} dt, \quad t > 0.$$

Для зображень і їх оригіналів справедливі два наступних твердження:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s p(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t); \quad \lim_{s \rightarrow \infty} s p(s) = P(0)$$

Нижче приведена таблиця формул перетворень Лапласа від основних функцій, які використовуються при розрахунках надійності.

Таблиця 4. Формули перетворень Лапласа.

Зображення	Оригінал
$\alpha p_1(s) + \beta p_2(s)$	$\alpha P_1(t) + \beta P_2(t)$
$-p(0) + sp(s)$	$P'(t)$
$\frac{p(s)}{s} + \frac{C}{s}$	$\int_0^t p(s)ds + C$
$\frac{1}{b} p\left(\frac{s}{b}\right), \quad b > 0$	$P(bt)$
$e^{-bs} p(s), \quad b \geq 0$	$P(t-b)$
$p_1(s)p_2(s)$	$\int_0^t p_1(s)p_2(t-s)ds$
$p^{(k)}(s)$	$(-1)^k t^k P(t)$
$p(s-a)$	$e^{at} P(t)$
$\frac{1}{s^n}, \quad n=1,2,\dots$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$
$\frac{1}{(s-b)^n}, \quad n=1,2,\dots$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{bt}$
$\frac{1}{s^2 + b^2}$	$\frac{1}{b} \sin bt$
$\frac{s}{s^2 + b^2}$	$\cos bt$
$\frac{1}{s^2 - b^2}$	$\frac{1}{b} sh bt$
$\frac{s}{s^2 - b^2}$	$ch bt$
$\frac{1}{s(s^2 + b^2)}$	$\frac{1}{b^2} (1 - \cos bt)$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 56

Продовження таблиці 4.

Зображення	Оригінал	Коефіцієнти
$\frac{1}{s(s-b)}$	$Ae^{bt} + K$	$A = \frac{1}{b}; \quad K = -\frac{1}{b}.$
$\frac{s+d}{s(s-b)}$	$Ae^{bt} + K$	$A = \frac{b+d}{b}; \quad K = -\frac{d}{b}$
$\frac{1}{(s-b)(s-c)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct}$	$A = \frac{1}{b-c}; \quad B = \frac{1}{c-b}$
$\frac{s+d}{(s-b)(s-c)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct}$	$A = \frac{b+d}{b-c}; \quad B = \frac{c+d}{c-b}$
$\frac{1}{s(s-b)(s-c)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + K$	$A = \frac{1}{b(b-c)}; \quad K = \frac{1}{bc}.$ $B = \frac{1}{c(c-b)};$
$\frac{s+d}{s(s-b)(s-c)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + K$	$A = \frac{b+d}{b(b-c)}; \quad K = \frac{d}{bc}.$ $B = \frac{c+d}{c(c-b)};$
$\frac{s^2 + gs + d}{s(s-b)(s-c)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + K$	$A = \frac{b^2 + gb + d}{b(b-c)}; \quad K = \frac{d}{bc}.$ $B = \frac{c^2 + gc + d}{c(c-b)};$
$\frac{1}{(s-b)(s-c)(s-d)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + Ce^{dt}$	$A = \frac{1}{(b-c)(b-d)};$ $B = \frac{1}{(c-b)(c-d)};$ $C = \frac{1}{(d-b)(d-c)}.$
$\frac{s+e}{(s-b)(s-c)(s-d)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + Ce^{dt}$	$A = \frac{b+e}{(b-c)(b-d)};$ $B = \frac{c+e}{(c-b)(c-d)};$ $C = \frac{d+e}{(d-b)(d-c)}.$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 57

Продовження таблиці 4.

Зображення	Оригінал	Коефіцієнти
$\frac{s^2 + gs + e}{(s - b)(s - c)(s - d)}$	$Ae^{bt} + Be^{ct} + Ce^{dt}$	$A = \frac{b^2 + bg + e}{(b - c)(b - d)};$ $B = \frac{c^2 + cg + e}{(c - b)(c - d)};$ $C = \frac{d^2 + dg + e}{(d - b)(d - c)}.$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 58

Додаток 3

Нормування умов експлуатації та виконання виробів

Нормування умов експлуатації та вид виконання виробу використовується у тих випадках, коли є відомий мікрокліматичний район, в якому буде експлуатуватися виріб, та місце розміщення виробу в цьому районі (на відкритому повітрі, в приміщенні та т. п.).

ДСТ 15150 встановлює 10 кліматичних виконання та 5 кліматичних категорій виробів.

Кліматичні виконання встановлюються в залежності від макрокліматичного району, в якому буде експлуатуватися виріб.

Для виробів, призначених для використання на суші, річках та озерах встановлюється таке маркування:

- у помірно-кліматі.....У
- у холодному кліматі.....ХЛ
- у тропічному вологому кліматі.....ТВ
- у тропічному сухому.....ТС
- у тропічному сухому та вологому.....Т
- у всіх районах на суші, річках та озерах.....О

Для виробів, що встановлюються на морських судах і призначених для роботи:

- у помірно-морському кліматі.....М
- у тропічно-морському кліматі.....ТМ
- при необмеженому плаванні.....ОМ

Для виробів, призначених для експлуатації у всіх макрокліматичних районах на суші та на морі.....В

В залежності від місця розташування виробу при експлуатації встановлені наступні категорії виробів:

- 1 – для роботи на відкритому повітрі;
- 2 – для роботи у приміщенні, де коливання температури та вологості повітря несуттєво відрізняються від коливання на відкритому повітрі та є порівняно вільний доступ зовнішнього повітря, наприклад, у палатках, кузовах автомобілів і т. д.;
- 3 – для роботи у зачинених приміщеннях з природньою вентиляцією, в яких не використовуючи штучні кліматичні умови, що регулюються;
- 4 – для роботи у приміщеннях з штучними кліматичними умовами, що регулюються. Ця група має дві підгрупи:
 - 4.1 - приміщення з кондиціонуванням повітря;
 - 4.2 - приміщення, що не використовує кондиціонування повітря;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 59

5 – для роботи у приміщеннях з підвищеною вологістю, наприклад, у підземних приміщеннях, що не опалюються, у шахтах, у підвалах, у ґрунті, у трюмах і т. д.

У технічному завданні на проектування (розробку, виготовлення) технічного виробу, як правило, вказуються експлуатаційні вимоги. Наприклад:

– виріб, призначений для експлуатації у помірному кліматі в приміщенні з штучними кліматичними умовами, що регулюються, але не використовується кондиціонування повітря;

– кліматична категорія та виконання виробу – У 4.2;

– виріб, призначений для експлуатації у вологому тропічному кліматі на відкритому повітрі:

– кліматична категорія та виконання – ТВ 1 та т. п.

Кожне сполучення кліматичної категорії та виконання виробу характеризується визначенням набором кліматичних факторів зовнішнього середовища, які мають наступні значення:

1) температура оточуючого повітря.....табл. ДЗ-1;

2) відносна вологість повітря.....табл. ДЗ-2;

3) зміна температури оточуючого повітря за 8 годин, °С

для виконання:

У, ХЛ, Т, ТС, О, В.....40

ТВ, ТМ.....10

М, ОМ.....30;

4) атмосферний тиск для наземних виробів, що не призначені для роботи у високогірних місцевостях:

робочі значення.....86,5 кПа (650... 800 мм рт.ст.)

нижнє граничне значення.....84 кПа (630 мм рт. ст.).

Приклад запису у технічному завданні експлуатаційних вимог до виробу, що призначений для експлуатації у помірному кліматі на відкритому повітрі:

кліматична категорія та виконання – У 1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 60

Таблиця ДЗ-1

Нормальні значення температури повітря.

Виконання виробу	Категорія виробу	Робочі значення, К (°С)			Граничне значення, К (°С)	
		верхнє	нижнє	середнє	верхнє	нижнє
1	2	3	4	5	6	7
У	4	308 (35)	274 (1)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		308 (35)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		308 (35)	268 (-5)	283 (10)	308 (35)	268 (-5)
		313 (40)	233 (-40)	283 (10)	318 (45)	223 (-50)
ХЛ	4	308 (35)	274 (1)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		308 (35)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		308 (35)	263 (-10)	283 (10)	308 (35)	263 (-10)
		313 (40)	213 (-60)	283 (10)	318 (45)	213 (-60)
ТВ	4	318 (45)	274 (1)	300 (27)	323 (50)	274 (1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		318 (45)	283 (10)	300 (27)	318 (45)	283 (10)
		308 (35)	274 (1)	283 (10)	308 (35)	274 (1)
		318 (45)	274 (1)	300 (27)	323 (50)	263 (-10)
Т, ТС	4	318 (45)	274 (1)	300 (27)	328 (55)	274 (1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
		318 (45)	283 (10)	300 (27)	318 (45)	283 (10)
О	4	318 (45)	274 (1)	300 (27)	328 (55)	274 (1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	283 (10)
		318 (45)	283 (10)	300 (27)	318 (45)	274 (1)
		308 (35)	263 (-10)	283 (10)	308 (35)	263 (-10)
		318 (45)	213 (-60)	300 (27)	328 (55)	213 (-60)
М	4.2	313 (40)	263 (-10)	293 (20)	313 (40)	263 (-10)
		308 (35)	288 (+15)	293 (20)	313 (40)	274 (+1)
		313 (40)	233 (-40)	283 (10)	318 (45)	233 (-40)
ТМ	4.2	318 (45)	274 (1)	300 (27)	318 (45)	274 (+1)
		298 (25)	283 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (+1)
		318 (45)	274 (1)	300 (27)	318 (45)	274 (+1)
СМ	4.2	318 (45)	263 (-10)	300 (27)	318 (45)	263 (-10)
	4.1	308 (35)	288 (+15)	293 (20)	313 (40)	274 (+1)
	1,2,3,5	318 (45)	233 (-40)	300 (27)	318 (45)	233 (-40)
В	4.2	318 (45)	274 (1)	300 (27)	328 (55)	274 (1)
	4.1	298 (25)	273 (10)	293 (20)	313 (40)	274 (1)
	5	318 (45)	233 (-40)	300 (27)	313 (15)	233 (-40)
	1,2,3	318 (45)	213 (-60)	300 (27)	328 (55)	213 (-60)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 61

Таблиця ДЗ-2

Норми відносної вологості повітря при експлуатації виробів.

Виконання виробу	Категорія виробу	Середньомісячне значення в найбільш теплий та вологий період		Верхнє значення
		Значення	Тривалість, місяців	
У	4, 4.1, 4.2	65% при 20°C	12	80% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	3	80% при 20°C	6	98% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	1.1	80% при 20°C	2	98% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	1.2	80% при 20°C	6	98% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	5	90% при 20°C	12	98% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
ХЛ	1.1, 2, 3, 4	65% при 20°C	12	80% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	4.1, 4.2			
	1	65% при 20°C	12	100% при 10°C та при більш низьких температурах з конденсацією вологи
	5	90% при 20°C	12	100% при 25°C та при більш низьких температурах з конденсацією вологи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 62

Продовження таблиці ДЗ-2

Норми відносної вологості повітря при експлуатації виробів.

Виконання виробу	Категорія виробу	Середньомісячне значення в найбільш теплий та вологий період		Верхнє значення
		Значення	Тривалість, місяців	
ТВ, Т, О	3, 4	80% при 27°C	12	98% при 35°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	4.2	80% при 27°C	3	
	1.1	90% при 27°C	4	
ТМ, СМ, В	1, 2, 5	90% при 27°C	12	100%при35°C та при більш низьких температурах з конденсацією вологи.
ТМ, СМ, В	4.1	65% при 20°C	12	80% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
	3. 4	80% при 20°C	6	98% при 25°C та при більш низьких температурах без конденсації вологи
М	1, 2	90% при 20°C	6	100%при25°C та при більш низьких температурах з конденсацією вологи
	5	90% при 20°C	12	

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 63

Додаток 4

Значення інтенсивностей відмов комплектуючих виробів.

Таблиця Д4-1

Назва виробу	Інтенсивність відмов $\lambda_0 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$
Інтегральні мікросхеми:	
Цифрові біполярні	0,1
Цифрові інші	0,3
Аналогові	0,8
Діоди:	
Кремнієві випрямляючі та імпульсні	0,05
Германієві випрямляючі та імпульсні	0,1
Стабілітрони	0,1
Транзистори:	
Біполярні (крім НВЧ потужних)	0,3
НВЧ потужні	0,5
Польові	0,3
Резистори:	
Постійні недротяні	0,008
Постійні недротяні об'ємні	0,005
Постійні недротяні регулюючі	0,04
Змінні недротяні	0,03
Змінні дротяні	0,04
Терморезистори	0,003
Конденсатори:	
Керамічні, дискові та трубчаті	0,01
Склянокерамічні	0,01
Скляні та склянометалеві	0,02
Слюдяні герметичні	0,05
Металопаперові	0,01
Паперові	0,05
Плівкові	0,02
Електролітичні алюмінієві	0,08

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 64

Продовження таблиці Д4-1

Оксиднонапівпровідникові	0,15
Трансформатори та дроселі:	
Силові	0,3
Імпульсні	0,05
Вихідні	1,0
Високочастотні	0,04
Котушки індуктивності	0,1
Комутаційні вироби:	
Перемикачі та вимикачі пакетні, кулачкові, щіткові.	0,5*
Тумблери	0,3*
Мікротумблери та мікроперемикачі	0,15*
Кнопки	0,2*
П'єзоелектричні вироби:	
Резонатори кварцові	0,2
Фільтри п'єзоелектричні кварцові	0,4
З'єднувачі:	
Прямокутні малогабаритні	0,05*
Для друкованих плат прямого контакту	0,01*
Контактні пари «гніздо-вилка»	0,01*
Клеми	0,01*
Інші вироби:	
Динамічні гучномовці	3,8
Батареї однорозрядні	30,0
Запобіжники	0,1
Вставки плавкі	0,3
З'єднання:	
Пайка	0,0001*
Скрутка	0,00003*
Зварка	0,00005*

Примітка: * – на один контакт (одноконтактну кнопку, мікро-тумблер, на одне з'єднання).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 65

Додаток 5

Корегуючі коефіцієнти до значень λ_0 комплектуючих виробів.

(Значення коефіцієнта $a_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$)

Таблиця Д5-1

Значення коефіцієнтів k_1 та k_2 .

Умови експлуатації	k_1 – вібрація	k_2 – удар
Лабораторні	1,00	1,00
Стаціонарні (польові)	1,05	1,10
Корабельні	1,30	1,05
Автофургонні	1,40	1,20
Залізничні	1,50	1,40
Авіація (ракети)	1,50	2,00

Таблиця Д5-2.

Значення коефіцієнта k_3

Клімат	k_3	
	Опалюване приміщення	Неопалюване приміщення
Холодний	1,05	1,5
Помірний	1,02	1,3
Субтропічний	1,00	1,4
Морський	1,50	1,7

Таблиця Д5-3

Значення коефіцієнта k_4

Умови експлуатації	Вологість %	Температура °C	k_4
Лабораторні	60. ..70	20. ..40	1,0
Стаціонарні (польові)	60. ..70	20. ..40	1,2
Корабельні	60. ..70	20. ..40	1,5
Автофургонні	90. ..98	20. ..25	2,0
Залізничні	90. ..98	30. ..40	2,5
Авіація (ракети)	60. ..70	20. ..40	1,2

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 66

Таблиця Д5-4. Значення коефіцієнта a_2 для інтегральних схем (ІС)

Т, °С	a_2						
	Технологія ІС*						
	ТТЛ, ДТЛ	ТТЛ Ш, ТТЛ	Мало- потуж- ні ТТЛШ	МД Н	КМД Н	РМД Н	Аналогов і
20	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	1,2	1,4	1,4	1,5	1,6	2,6	2,6
40	1,7	2,0	2,0	2,3	3,0	5,0	5,0
50	2,3	2,7	3,4	4,5	8,0	8,8	10,0
60	3,0	4,0	5,0	8,5	15,0	15,0	20,0

* – Корпус пластмасовий.

Таблиця Д5-5. Значення коефіцієнта a_2 для діодів кремнієвих (крім НВЧ)

Т, °С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,02	0,03	0,06	0,08	0,13	0,20	0,32	0,47	0,73	1,0
30	0,02	0,04	0,07	0,09	0,16	0,24	0,39	0,57	0,80	
35	0,03	0,05	0,08	0,11	0,18	0,28	0,45	0,67	0,87	
40	0,03	0,06	0,10	0,14	0,22	0,34	0,53	0,77		
45	0,04	0,07	0,11	0,17	0,26	0,40	0,60	0,87		
50	0,05	0,09	0,12	0,20	0,32	0,49	0,74	1,0		
55	0,06	0,11	0,17	0,23	0,37	0,57	0,87			
60	0,08	0,13	0,21	0,30	0,44	0,69	0,93			

Таблиця Д5-6. Значення коефіцієнта a_2 для кремнієвих діодів НВЧ

Т, °С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35	0,38	0,43	0,50	0,65	1,0
30	0,27	0,29	0,30	0,33	0,35	0,40	0,46	0,55	0,75	
35	0,28	0,30	0,31	0,34	0,37	0,41	0,50	0,60	0,90	
40	0,29	0,30	0,32	0,35	0,39	0,45	0,50	0,70		
45	0,29	0,31	0,33	0,36	0,40	0,48	0,60	0,80		
50	0,30	0,32	0,35	0,38	0,43	0,50	0,65	1,0		

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015						Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024		
	Випуск 1	Зміни 0		Екземпляр № 1			Арк 75 / 67		

55	0,30	0,33	0,35	0,40	0,46	0,55	0,75			
60	0,31	0,34	0,37	0,41	0,50	0,60	0,90			

Таблиця Д5-7

Значення коефіцієнта a_2 для германієвих діодів (крім діодів НВЧ)

Т, °С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,10	0,12	0,15	0,20	0,26	0,35	0,48	0,58	0,77	1,0
30	0,11	0,14	0,18	0,24	0,33	0,41	0,55	0,72	0,95	
35	0,14	0,17	0,25	0,31	0,40	0,52	0,70	0,87		
40	0,16	0,22	0,31	0,40	0,50	0,65	0,83			
45	0,20	0,30	0,38	0,48	0,62	0,80				
50	0,26	0,36	0,48	0,60	0,77					
55	0,35	0,45	0,60	0,75						
60	0,42	0,55	0,72	0,90						

Таблиця Д5-8

Значення коефіцієнта a_2 для германієвих діодів НВЧ

Т, °С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,35	0,38	0,40	0,43	0,46	0,51	0,60	0,67	0,81	1,0
30	0,38	0,40	0,43	0,49	0,54	0,60	0,70	0,84		
35	0,40	0,43	0,48	0,54	0,62	0,70	0,86			
40	0,43	0,48	0,54	0,62	0,73	0,86				
45	0,48	0,54	0,62	0,73	0,90					
50	0,57	0,65	0,75	0,92						
55	0,65	0,78	0,96							
60	0,78	0,96								

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 68

Таблиця Д5-9.
Значення коефіцієнта a_2 для стабілітронів

T, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,17	0,20	0,21	0,24	0,27	0,32	0,39	0,48	0,61	1,0
30	0,18	0,20	0,22	0,25	0,29	0,32	0,39	0,52	0,70	
40	0,19	0,21	0,24	0,27	0,32	0,39	0,42	0,61	1,0	
50	0,21	0,23	0,27	0,30	0,35	0,42	0,55	0,84		
55	0,21	0,24	0,27	0,32	0,39	0,48	0,60	1,0		
60	0,23	0,25	0,29	0,32	0,39	0,50	0,70			

Таблиця Д5-10
Значення коефіцієнта a_2 для германієвих біполярних транзисторів
(крім НВЧ потужних).

T, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,10	0,12	0,15	0,20	0,26	0,35	0,48	0,58	0,77	1,0
30	0,11	0,14	0,18	0,24	0,33	0,41	0,55	0,77	0,95	
35	0,14	0,17	0,25	0,31	0,40	0,52	0,70	0,87		
40	0,16	0,22	0,31	0,40	0,50	0,65	0,83			
45	0,20	0,30	0,38	0,48	0,62	0,80				
50	0,26	0,36	0,48	0,60	0,77					
55	0,35	0,45	0,60	0,75						
60	0,42	0,55	0,72	0,90						

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 69

Таблиця Д5-11

Значення коефіцієнта a_2 для кремнієвих біполярних транзисторів
(крім НВЧ потужних).

Т, °С	a_2									
	K_n									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,14	0,16	0,20	0,23	0,27	0,31	0,40	0,52	0,70	1,0
30	0,15	0,17	0,20	0,25	0,29	0,33	0,44	0,54	0,77	
40	0,16	0,20	0,23	0,27	0,31	0,40	0,52	0,70	1,0	
50	0,18	0,23	0,25	0,31	0,37	0,46	0,60	0,90		
55	0,20	0,25	0,27	0,31	0,40	0,52	0,70	1,0		
60	0,20	0,25	0,30	0,33	0,44	0,54	0,77			

Таблиця Д5-12

Значення коефіцієнта a_2 , для транзисторів НВЧ потужних.

Т, °С	a_2	
	A_e	A_n
20	1,0	0,30
30	1,4	0,42
40	1,7	0,54
50	2,5	0,66
60	3,6	0,78

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 71

Таблиця Д5-16

Значення коефіцієнта a_2 для постійних дріт'яних резисторів.

Т, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,13	0,16	0,20	0,24	0,30	0,38	0,48	0,60	0,78	1,0
30	0,14	0,17	0,20	0,26	0,31	0,38	0,51	0,65	0,83	1,08
40	0,15	0,18	0,22	0,27	0,35	0,45	0,58	0,75	0,98	1,27
50	0,16	0,19	0,24	0,31	0,40	0,53	0,67	0,87	1,20	
60	0,17	0,21	0,27	0,35	0,45	0,58	0,77	1,04		

Таблиця Д5-17

Значення коефіцієнта a_2 для змінних
недріт'яних плівкових резисторів

Т, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,15	0,20	0,24	0,30	0,36	0,45	0,57	0,66	0,80	1,0
30	0,16	0,20	0,26	0,33	0,40	0,50	0,63	0,74	0,90	1,1
40	0,20	0,26	0,32	0,40	0,50	0,62	0,77	0,94	1,15	
50	0,25	0,32	0,40	0,52	0,65	0,80	1,0			
60	0,32	0,42	0,54	0,70	0,87	1,09				

Таблиця Д5-18

Значення коефіцієнта a_2 для перемінних дріт'яних резисторів.

Т. °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,30	0,36	0,44	0,52	0,60	0,68	0,75	0,83	0,90	1,0
30	0,30	0,37	0,45	0,53	0,62	0,70	0,78	0,85	0,93	1,02
40	0,35	0,43	0,50	0,60	0,68	0,75	0,80	0,90	1,06	
50	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,02			
60	0,56	0,70	0,80	0,96	1,1					

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 72

Таблиця Д5-19

Значення коефіцієнта a_2 для терморезисторів

K_H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
a_2	1,0	1,05	1,15	1,33	1,5	2,0	2,3	3,0	4,2	7,0

Таблиця Д5-20

Значення коефіцієнта a_2 для керамічних,
склянокерамічних та скляномалієвих конденсаторів.

T, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,03	0,03	0,05	0,10	0,15	0,23	0,36	0,52	0,75	1,0
30	0,03	0,04	0,06	0,12	0,18	0,30	0,43	0,64	0,90	1,2
40	0,05	0,06	0,10	0,15	0,30	0,48	0,75	1,1		
50	0,07	0,08	0,13	0,22	0,36	0,60	0,85	1,2		
60	0,10	0,12	0,20	0,32	0,52	0,84	1,3			

Таблиця Д5-21

Значення коефіцієнта a_2 для скляних конденсаторів.

T, °C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,06	0,06	0,07	0,07	0,12	0,18	0,28	0,46	0,68	1,0
30	0,06	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,32	0,53	0,80	
40	0,09	0,10	0,12	0,15	0,20	0,30	0,47	0,73	1,1	
50	0,15	0,15	0,16	0,18	0,26	0,40	0,65	1,0		
60	0,20	0,20	0,20	0,26	0,38	0,60	0,90	1,4		

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 73

Таблиця Д5-22
Значення коефіцієнта a_2 для слюдяних конденсаторів

T, °C	a_2									
	K_n									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,06	0,07	0,10	0,12	0,17	0,26	0,38	0,54	0,75	1,00
30	0,08	0,10	0,12	0,15	0,22	0,33	0,48	0,68	0,93	1,30
40	0,12	0,14	0,17	0,23	0,34	0,62	0,75	1,00		
50	0,18	0,20	0,26	0,37	0,54	0,80	1,10			
60	0,30	0,32	0,40	0,57	0,85	1,30				

Таблиця Д5-23
Значення коефіцієнта a_2 для паперових
та металопаперових конденсаторів.

T, °C	a_2									
	K_n									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,30	0,45	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	1,0
30	0,35	0,50	0,55	0,64	0,70	0,74	0,80	0,85	0,90	1,05
40	0,40	0,52	0,58	0,66	0,72	0,76	0,85	0,90	1,0	
50	0,45	0,55	0,62	0,70	0,80	0,85	0,95	1,0		
60	0,50	0,60	0,75	0,80	0,90	1,0				

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 74

Додаток 6

Формули розрахунку коефіцієнтів електричного навантаження для різних типів елементів.

Таблиця Д6-1.

Назва елементів	Контролюємий параметр	Формула розрахунку K_n
Інтегральні мікросхеми	Загальна потужність, що розсіюється мікросхемою	$K_n = P_{\text{факт}}/P_{\text{доп ТУ}}$
Напівпровідникові діоди	Прямий струм (випрямлений струм)	$K_n = I_{\text{пр.факт}}/I_{\text{пр. доп ТУ}}$
Стабілітрони	Максимальний струм	$K_n = I_{\text{ст.факт}}/I_{\text{ст. доп ТУ}}$
Транзистори	Загальна потужність, що розсіюється транзистором	$K_n = P_{\text{факт}}/P_{\text{доп ТУ}}$
Тиристори	Випрямлений струм	$K_n = I_{\text{пр.факт}}/I_{\text{пр. доп}}$
Напівпровідникові оптоелектронні прилади	Прямий струм	$K_n = I_{\text{пр.факт}}/I_{\text{пр. доп ТУ}}$
Резистори постійні	Потужність розсіювання	$K_n = P_{\text{факт}}/P_{\text{доп ТУ}}$
Резистори змінні	Робочий струм	$K_n = I_{\text{роб.факт}}^2/I_{\text{доп}}^2$ ТУ
Конденсатори	Сума постійної, змінної, імпульсної напруги на конденсаторі	$K_n = U_{\text{роб.факт}}/U_{\text{доп ТУ}}$
Трансформатори	Струм навантаження	$K_n = I_{\text{факт}}/I_{\text{доп ТУ}}$
Дроселі, котушки індуктивності	Щільність струму в провіднику котушки	$K_n = J_{\text{факт}}/J_{\text{доп ТУ}}$
Комутаційні елементи	Потужність, що комутується	$K_n = P_{\text{факт}}/P_{\text{доп ТУ}}$
З'єднувачі	Робочий струм, що протікає через контакт	$K_n = I_{\text{пр.факт}}/I_{\text{пр. доп ТУ}}$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.01/133.00.1/М/ВК2Х-1- 2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 75 / 75

Додаток 7

Затрати часу на відновлення працездатного стану (заміни) комплектуючих виробів технічних пристроїв.

Таблиця Д7-1.

Назва елемента	Затрати часу,
Інтегральні мікросхеми	0,50... 2,82
Транзистори	0,50... 1,50
Напівпровідникові діоди,	0,30... 1,30
Резистори	0,30... 1,28
Конденсатори	0,40... 1,70
Трансформатори	0,68... 2,85
Перемикачі	0,25... 1,26
Реле	0,70... 2,98
Інші вироби (з'єднувачі, шнури	0,58... 3,20