

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторно-практичних занять з дисципліни
«Надійність технічних систем» на тему «Резервування
елементів технічних систем» для студентів спеціальності
133 Галузеве машинобудування
освітня програма «Підйомно-транспортні, дорожні,
будівельні, меліоративні машини і обладнання»**

2019

Методичні вказівки до лабораторно-практичних занять з дисципліни “Надійність технічних систем” на тему «Резервування елементів технічних систем» для студентів спеціальності 133 Галузеве машинобудування освітня програма «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання» /Укл.: М.І. Носенко, Н.О. Задоя – Запоріжжя. ЗНТУ, 2019. – 31 с.

Укладач: М.І. Носенко, доцент, к.т.н.
Н.О. Задоя, доцент, к.т.н.

Рецензент: Г.П. Волков, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск:

Л.М. Мартовицький, доцент, к.т.н., зав.каф. ДМ і ПТМ

Затверджено
на засіданні кафедри
“Деталі машин і ПТМ”
Протокол № 4
від 23 січня 2019 р.

Рекомендовано
до видання
НМК М-факультета
Протокол № 5
Від 21 лютого 2019 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5	5
ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПРИ РЕЗЕРВУВАННІ ЗАМІЩЕННЯМ В РЕЖИМІ ПОЛЕГШЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ	
1.1 Теоретичні положення	5
1.2 Завдання	7
2. ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6	11
РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ІЗ ПОЕЛЕМЕНТНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ	
2.1 Теоретичні положення	11
2.2 Завдання	13
3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	19
4 ЛІТЕРАТУРА	21
ДОДАТКИ	22

ВСТУП

Неперервне удосконалення і розвиток всіх галузей техніки характеризується широким використанням різноманітних технічних систем у всіх сферах керування і промислового виробництва. Функції, які виконуються сучасними технічними системами, надто складні, а задачі, які вирішуються надзвичайно відповідальні. Тому необхідність визначення, забезпечення і підвищення надійності технічних систем є однією із головних проблем отримання потрібного рівня якості продукції, окремо в галузі машинобудування.

Надійність – це внутрішня властивість системи. Рівень надійності встановлюється на етапі проектування. На наступних етапах виготовлення, складання і проведення випробувань підвищити цей закладений рівень надійності неможливо без внесення змін в основну конструкцію. На етапі проектування визначається структура системи, котра також впливає на рівень надійності і визначає витрати, необхідні для забезпечення цього рівня. Тому важливо, щоб конструктор і технолог мали змогу зробити оцінку надійності і вартості різних проектних рішень перед прийняттям остаточного варіанту розробляемої технічної системи.

В наведеному теоретичному матеріалі викладено основні аналітичні залежності, знання, розуміння та вміння користування якими необхідні для практичного засвоєння даного підрозділу курсу «Надійність технічних систем».

Розв'язання запропонованих завдань по визначенню показників надійності технічних систем при резервуванні заміщенням в режимі полегшеного і ненавантаженого резерву, а також при поелементному резервуванні дозволяє студентам зробити порівняльну оцінку і висновки про можливість підвищення надійності технічних систем при застосуванні конкретних способів резервування окремих елементів системи.

1 ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПРИ РЕЗЕРВУВАННІ ЗАМІЩЕННЯМ В РЕЖИМІ ПОЛЕГШЕНОГО ТА НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУ

1.1 Теоретичні відомості

В даному випадку резервні елементи знаходяться в полегшеному режимі до моменту їх включення в роботу. Надійність резервного елемента при цьому вище надійності основного елемента, тому що резервні елементи знаходяться в режимі недовантаження до моменту їх включення в роботу.

Ймовірність відмови резервованої системи з полегшеним резервуванням визначається відношенням

$$Q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} \left(1 - e^{-\lambda_1 t} \right)^i \right],$$

де
$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} j + \frac{\lambda_0}{\lambda_i}.$$

Тут λ_i – інтенсивність відмови резервного елемента в режимі недовантаження до моменту включення його в роботу;

λ_0 – інтенсивність відмови резервного елемента у стані роботи;

m – кратність резервування або кількість резервних елементів.

Ймовірність безвідмовної роботи системи з полегшеним резервуванням визначається залежністю

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} \left(1 - e^{-\lambda_1 t} \right)^i \right].$$

Середній час безвідмовної роботи системи з полегшенням резервуванням

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{1}{\lambda_0} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+ik},$$

$$\text{де } k = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}.$$

Частота відмов (щільність ймовірності розподілу часу t безвідмовної роботи) $f_c(t)$ системи з полегшенням резервуванням

$$f_c(t) = \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} \left(1 - e^{-\lambda_1 \cdot t} \right)^i - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{(i-1)!} \left(1 - e^{-\lambda_1 \cdot t} \right)^{i-1} \right].$$

Інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ системи з полегшенням резервуванням

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \lambda_0 \left[1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} e^{-\lambda_1 \cdot t} \frac{\sum_{i=1}^m \frac{a_i}{(i-1)!} \left(1 - e^{-\lambda_1 \cdot t} \right)^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} \left(1 - e^{-\lambda_1 \cdot t} \right)^i} \right].$$

При $\lambda_1 = 0$ отримується режим ненавантаженого резерву.

Ймовірність відмови резервованої системи з ненавантаженим резервуванням визначається відношенням

$$Q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!}.$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервом визначається формулою

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!}.$$

Середній час безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервом

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{m+1}{\lambda_0}.$$

Інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ системи з ненавантаженим резервом

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda_0^{m+1} \cdot t^m}{m! \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!}}.$$

1.2 Завдання

Завдання 1.2.1

Система складається із N рівнонадійних елементів. Середній час роботи елемента T_{cp} . Робота елементів системи підпорядкована експоненційному закону надійності. Основна і резервна системи рівнонадійні.

Для часу t роботи системи визначити:

- ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$;
- середній час безвідмовної роботи $T_{cp.c}$, год.;
- частоту відмов (щільність ймовірності розподілу часу t безвідмовної роботи) $f_c(t)$, $\frac{1}{\text{год}}$;

- інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$, $\frac{1}{\text{год}}$.

у наступних випадках: а) система нерезервована;

б) система дубльована при ввімкненні резерву за способом заміщення (ненавантажений резерв).

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 1.1.

Рішення

$$\text{а) } \lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = N \cdot \lambda; \quad \lambda_i = \frac{1}{T_{cp.i}}; \quad i = 1, N; \quad \lambda_i = \lambda;$$

$$T_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_c}; \quad f_c(t) = \lambda_c(t) \cdot P_c(t); \quad \lambda_c(t) = \lambda_c; \quad P_c(t) = e^{-\lambda_c t};$$

$$\text{б) } T_{cp.c} = \frac{m+1}{\lambda_c}, \quad m=1; \quad P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 \cdot t); \quad \lambda_0 = \lambda_c;$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t} (1 + \lambda_c t);$$

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \lambda_c^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda_c t}; \quad \lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda_c^2 \cdot t}{1 + \lambda_c \cdot t}.$$

Завдання 1.2.2.

Основний елемент системи має інтенсивність відмов λ_0 . Дублюючий елемент, до відмови основного, знаходиться у стані очікування (в режимі полегшеного резерву). Інтенсивність відмов дублюючого елемента λ_1 .

Протягом часу t роботи системи визначити:

- ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$;

- середній час безвідмовної роботи $T_{cp.c}$, год.;

- частоту відмов (щільність ймовірності розподілу часу t

безвідмовної роботи) $f_c(t)$, $\frac{1}{\text{год}}$;

- інтенсивність відмов $\lambda_c(t), \frac{1}{\text{год}}$.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 1.2.

Рішення

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} \right);$$

$$T_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{1 + i \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} = \frac{1}{\lambda_0} \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} \right);$$

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \lambda_0 \cdot \frac{\lambda_1 + \lambda_0}{\lambda_1} \cdot e^{-\lambda_0 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t});$$

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{\lambda_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})}{1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} e^{-\lambda_1 t}}.$$

Завдання 1.2.3.

Система складається із двох рівнонадійних елементів. Ймовірність безвідмовної роботи елемента протягом часу t дорівнює λ . Другий елемент системи вмикається при відмові першого (режим ненавантаженого резерву). Робота елементів системи підпорядкована експоненційному закону надійності.

Протягом часу t роботи системи визначити:

- ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$;
- середній час безвідмовної роботи $T_{cp.c}$, год.;

- частоту відмов $f_c(t)$, $\frac{1}{\text{ГОД}}$;
- інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$, $\frac{1}{\text{ГОД}}$.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 1.3.

Рішення

$$m = 1.$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} (1 + \lambda_0 \cdot t);$$

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t};$$

$$\text{за додатком А} \Rightarrow \lambda_0 \cdot t \Rightarrow \lambda_0;$$

$$T_{cp.c} = \frac{m+1}{\lambda_0};$$

$$f_c(t) = \lambda_0^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t};$$

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_0^2 \cdot t}{1 + \lambda_0 \cdot t}.$$

2 ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ІЗ ПОЕЛЕМЕНТНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

2.1 Теоретичні відомості

При поелементному резервуванні окремо резервуються елементи системи (рис. 2.1).

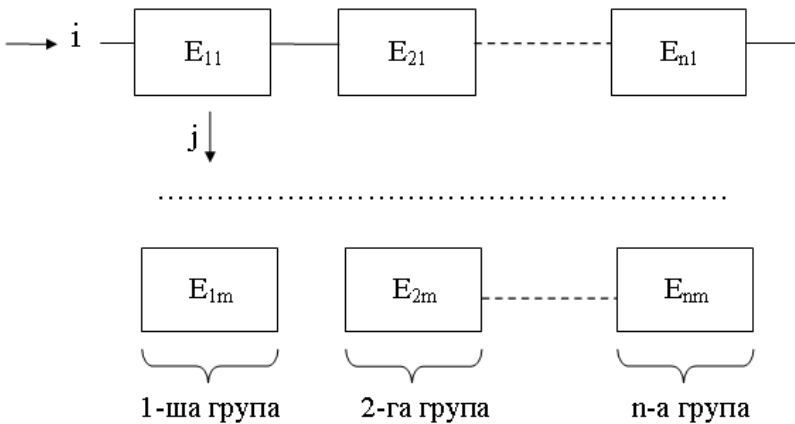


Рисунок 2.1 – Структурна схема з поелементним резервуванням

Визначення кількісних характеристик надійності системи

Ймовірність відмови i -ї групи

$$Q_i(t) = \prod_{j=0}^m Q_{ij}(t); \quad i = 1, n,$$

де $Q_{ij}(t)$ – ймовірність відмови елементу E_{ij} в інтервалі часу $(0, t)$.

Ймовірність безвідмовної роботи j -ої групи

$$P_i(t) = 1 - Q(t) = 1 - \sum_{j=0}^{m_i} [1 - P_{ij}(t)]; \quad i = 1, n,$$

де $P_{ij}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи елементу E_{ij} в інтервалі часу $(0, t)$;

m_i – кратність резервування елементу j -ої групи.

Ймовірність безвідмовної роботи системи з поелементним резервуванням визначається загальною формулою

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

або

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=0}^{m_i} [1 - P_{ij}(t)] \right).$$

Для рівнонадійних елементів системи і $m_i = m = const$ отримують

$$P_{ij}(t) = P(t);$$

$$P_c(t) = \left[1 - [1 - P(t)]^{m+1} \right]^n.$$

Якщо

$$P_{ij}(t) = P_i(t),$$

то загальна формула для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи з поелементним резервуванням приймає вигляд

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left(1 - [1 - P_i(t)]^{m_{i+1}} \right).$$

При експоненційному законі надійності, коли $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$,

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left(1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m_{i+1}} \right).$$

Для рівнонадійних елементів системи

$$P_c(t) = \left(1 - [1 - e^{-\lambda t}]^{m+1} \right)^n,$$

Середній час безвідмовної роботи системи

$$T_{ср.с} = \int_0^{\infty} P_c(t) \cdot dt.$$

З урахуванням рівнонадійності елементів отримують

$$T_{ср.с} = \frac{(n-1)!}{\lambda \cdot (m+1)} \cdot \sum_{j=0}^m \frac{1}{v_j(v_j+1) \dots (v_j+n-1)},$$

де $v_j = \frac{j+1}{m+1}.$

2.2 Завдання

Завдання 2.2.1

Система складається із N – елементів, які дублюються і їх робота підпорядкована експоненційному закону надійності. Кількість рівнонадійних елементів кожного типу E_i складає n_{Ei} . Інтенсивність відмов кожного елементу відповідного типу дорівнює λ_{Ei} .

Протягом часу роботи t визначити ймовірність безвідмовної роботи системи $P_c(t)$.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 2.1.

Рішення

Має місце роздільне резервування $m_i = m = 1$;

Число елементів нерезервованої системи

$$N = \sum_{i=1}^E n_{Ei};$$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N \left(1 - \left[1 - e^{-\lambda_i \cdot t} \right]^{m_i+1} \right);$$

$$\lambda_i \ll 1 \Rightarrow e^{-\lambda_i \cdot t} \cong 1 - e^{-\lambda_i \cdot t};$$

$$P_c(t) = 1 - t^2 \sum_{i=1}^N n_{Ei} \cdot \lambda_i^2.$$

Завдання 2.2.2

Схема резервованої системи наведена на рис. 2.2. Робота елементів системи, які мають інтенсивність відмов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, підпорядкована експоненційному закону надійності.

Для даної системи визначити:

- середній час безвідмовної роботи $T_{cp,c}$, год.;

протягом часу роботи t , год.

- ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$;

- частоту відмов $f_c(t), \frac{1}{\text{год}}$;

- інтенсивність відмов $\lambda_c(t), \frac{1}{\text{год}}$.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 2.2.

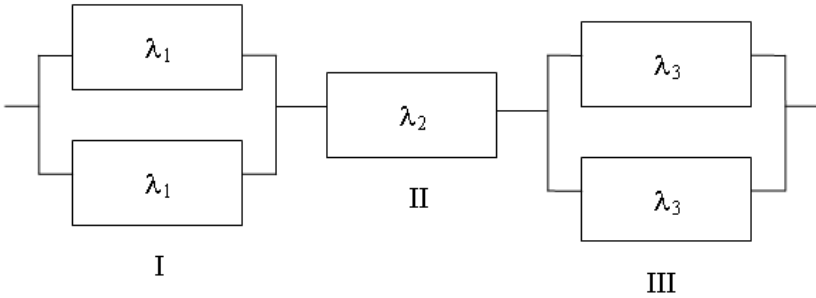


Рисунок 2.2 – Структурна схема резервованої системи

Рішення

$$T_{c.p.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) \cdot dt; \quad P_c(t) = P_I(t) \cdot P_{II}(t) \cdot P_{III}(t);$$

$$P_I(t) = 1 - Q_I(t); \quad Q_I(t) = [1 - P_1(t)]^2; \quad P_I(t) = 2P(t)_1 - P_1^2(t);$$

$$P_{II}(t) = P_2(t);$$

$$P_{III}(t) = 1 - Q_{III}(t); \quad Q_{III}(t) = [1 - P_3(t)]^2;$$

$$P_{III}(t) = 2P_3(t) - P_3^2(t);$$

$P_c(t)$ визначити через $P_i = e^{-\lambda_i t}$; значення функції $e^{-x} \Rightarrow$ додаток А.

Визначити $T_{c.p.c}$;

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)}; \quad f_c(t) = -\frac{d \cdot P_c(t)}{dt}.$$

Завдання 2.2.3

Схема резервованої системи наведена на рисунку 2.3. Робота рівнонадійних елементів системи, які мають інтенсивність відмов λ , підпорядкована експоненційному закону надійності.

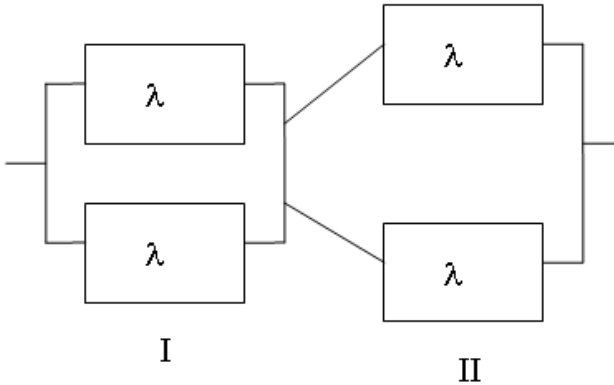


Рисунок 2.3 – Структурна схема резервованої системи

Для даної системи визначити:

- середній час безвідмовної роботи системи $T_{ср.с}$, год.;
протягом часу роботи t , год.

- ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t), \frac{1}{\text{ГОД}}$;

- частоту відмов $f_c(t), \frac{1}{\text{ГОД}}$;

- інтенсивність відмов $\lambda_c(t), \frac{1}{\text{ГОД}}$.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 2.3.

Рішення.

$$T_{cp.c} = \int_0^{\infty} P_c(t) \cdot dt;$$

$$P_c(t) = P_I(t) \cdot P_{II}(t) = P_I^2(t), \text{ так як } P_I(t) = P_{II}(t);$$

$$P_I(t) = 1 - Q_I(t); \quad Q_I(t) = Q^2(t); \quad Q(t) = 1 - P(t);$$

$$P(t) = e^{-2\lambda t};$$

$$P_c(t) = 4 \cdot e^{-2\lambda t} - 4 \cdot e^{-3\lambda t} + e^{-4\lambda t}.$$

$$T_{cp.c} = \frac{11}{12 \cdot \lambda};$$

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = 4\lambda \cdot e^{2\lambda t} (2 - 3e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t});$$

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{4\lambda \cdot (1 - e^{-\lambda t})}{2 - e^{-\lambda t}}.$$

Завдання 2.2.4

Нерезервована система складається із N рівнонадійних елементів, робота яких підпорядкована експоненційному закону надійності. Для підвищення надійності системи передбачено роздільне дублювання елементів. Для часу роботи t дубльованої системи із потрібною ймовірністю безвідмовної роботи $P_c^{II}(t)$, при умові

відсутності післядії відмов, визначити оцінку середнього значення інтенсивності відмов λ , $\frac{1}{\text{ГОД}}$ одного елементу.

Вихідні дані до розрахунку, відповідно варіанту, наведено в таблиці 2.4.

Рішення

$P_c(t) = \left(1 - [1 - P(t)]^2\right)^N$ – ймовірність безвідмовної роботи

системи при роздільному дублюванні та рівнонадійних елементах;

$P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи одного елементу.

Повинно бути

$$\left(1 - [1 - P(t)]^2\right)^N \geq P_c^{\text{II}}(t) \Rightarrow P(t) \geq 1 - \sqrt{1 - \sqrt[N]{P_c^{\text{II}}(t)}};$$

$$1 - \lambda \cdot t \geq 1 - \sqrt{1 - \sqrt[N]{P_c^{\text{II}}(t)}}; \quad \lambda \leq \frac{\sqrt{1 - \sqrt[N]{P_c^{\text{II}}(t)}}}{t};$$

$\sqrt[N]{P_c^{\text{II}}(t)} = \left(1 - [1 - P_c^{\text{II}}(t)]\right)^{\frac{1}{N}}$ – розкладається в ряд за ступінем $\frac{1}{N}$

$$\left(1 - [1 - P_c^{\text{II}}(t)]\right)^{\frac{1}{N}} \cong 1 - \frac{1}{N} \cdot [1 - P_c^{\text{II}}(t)].$$

$$\lambda \leq \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot [1 - P_c^{\text{II}}(t)]}}{t}.$$

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Характеристика і структурна схема системи із полегшеним резервуванням.
2. Визначення ймовірності відмови резервованої системи із полегшеним резервуванням.
3. Визначення ймовірності безвідмовної роботи системи із полегшеним резервуванням.
4. Визначення частоти відмов системи із полегшеним резервуванням.
5. Визначення інтенсивності відмов системи із полегшеним резервуванням.
6. Середній час безвідмовної роботи системи із полегшеним резервуванням.
7. Характеристика та структурна схема системи із ненавантаженим резервуванням.
8. Визначення ймовірності відмов резервованої системи із ненавантаженим резервуванням.
9. Середній час безвідмовної роботи системи із ненавантаженим резервом.
10. Інтенсивність відмов системи із ненавантаженим резервом.
11. Визначення ймовірності безвідмовної роботи системи із ненавантаженим резервом.
12. Характеристика та структурна схема системи із поелементним резервуванням.
13. Визначення ймовірності відмови i -ї групи елементів системи при поелементному резервуванні.
14. Визначення ймовірності безвідмовної роботи j -ї групи елементів системи при поелементному резервуванні.
15. Визначення загальної ймовірності безвідмовної роботи системи із поелементним резервуванням.
16. Визначення загальної ймовірності безвідмовної роботи системи рівнонадійних елементів із поелементним резервуванням.
17. Визначення ймовірності безвідмовної роботи системи із поелементним резервуванням при використанні експоненційного закону надійності.

18. Визначення ймовірності безвідмовної роботи системи рівнонадійних елементів із поелементним резервуванням при використанні експоненційного закону надійності.
19. Середній час безвідмовної роботи системи із поелементним резервуванням.
20. Середній час безвідмовної роботи системи рівнонадійних елементів із поелементним резервуванням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Канарчук В.Є., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. – К.: Либідь, 2003. – 424 с.
2. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения. М.: Маш-е, 1995. – 304 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
4. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
5. Надежность изделий машиностроения. Теория и практика. Учебник для вузов/В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.
6. Рыжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г. Основы теории надежности: Уч. Пос. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002.

ДОДАТКИ

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до завдання 1.2.1

Параметри	В а р і а н т и									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	10	8	12	14	16	10	8	12	14	16
$T_{cp.}$, год.	1000	1200	1400	800	1600	1600	800	1000	1400	1200
t , год.	50	45	40	55	60	40	45	55	60	50
Параметри	В а р і а н т и									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
N	9	11	13	15	11	13	15	9	11	13
$T_{cp.}$, год.	1500	1300	1100	900	1500	1300	1100	900	1500	1300
t , год.	47	49	43	51	53	57	47	59	45	51

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до завдання 1.2.2

Параметри	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_0 \cdot 10^{-3}$, 1/год.	0.4	0.3	0.5	0.6	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.3
$\lambda_1 \cdot 10^{-3}$, 1/год.	0.06	0.05	0.04	0.07	0.08	0.07	0.06	0.04	0.08	0.06
t , год.	100	110	120	90	80	100	110	120	90	80
Параметри	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\lambda_0 \cdot 10^{-3}$, 1/год.	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.3	0.4	0.6	0.5
$\lambda_1 \cdot 10^{-3}$, 1/год.	0.06	0.04	0.05	0.08	0.07	0.06	0.07	0.08	0.06	0.04
t , год.	90	120	110	100	100	80	110	80	120	120

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до завдання 1.2.3

Параметри	В а р і а н т и									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t , год.	1000	1100	1200	900	800	1000	1100	1200	900	800
P	0.95	0.94	0.93	0.96	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93
Параметри	В а р і а н т и									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t , год.	800	900	1200	1100	1000	800	900	1200	1100	1000
P	0.95	0.94	0.93	0.96	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання 2.2.1

Тип елементу E_i		В а р і а н т и									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1	n_{E1}	1	2	1	4	2	1	4	3	5	2
	$\lambda_1 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	2.16	2.10	2.24	2.12	2.08	2.16	2.20	2.24	2.12	2.08
E_2	n_{E2}	5	3	2	1	1	4	1	2	2	4
	$\lambda_2 \cdot 10^{-5}$, 1/год	0.23	0.18	0.15	0.20	0.28	0.23	0.18	0.15	0.20	0.28
E_3	n_{E3}	3	3	4	1	1	2	5	1	4	1
	$\lambda_3 \cdot 10^{-5}$, 1/год	0.32	0.40	0.36	0.42	0.24	0.32	0.40	0.36	0.42	0.24
E_4	n_{E4}	1	4	3	2	1	5	2	1	2	3
	$\lambda_4 \cdot 10^{-5}$, 1/год	0.78	0.65	0.70	0.60	0.86	0.78	0.65	0.70	0.60	0.86
E_5	n_{E5}	1	2	3	1	4	1	3	2	3	2
	$\lambda_5 \cdot 10^{-5}$, 1/год	0.09	0.07	0.12	0.10	0.06	0.09	0.07	0.12	0.10	0.06
t , год.		5000	4500	4000	5500	6000	4000	5000	4500	5500	6000

Продовження таблиці 2.1

Тип елемента E_i		В а р і а н т и									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
E_1	n_{E1}	2	3	2	3	1	4	1	3	1	2
	$\lambda_1 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	2.08	2.12	2.24	2.20	2.16	2.08	2.12	2.24	2.20	2.16
E_2	n_{E2}	3	2	1	2	5	1	2	3	1	4
	$\lambda_2 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	0.28	0.20	0.15	0.18	0.23	0.28	0.20	0.15	0.18	0.23
E_3	n_{E3}	1	4	1	5	2	1	1	4	3	3
	$\lambda_3 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	0.24	0.42	0.36	0.40	0.32	0.24	0.42	0.36	0.40	0.32
E_4	n_{E4}	4	2	2	1	4	1	1	2	5	3
	$\lambda_4 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	0.86	0.60	0.70	0.65	0.78	0.86	0.60	0.70	0.65	0.78
E_5	n_{E5}	2	5	3	4	1	2	4	1	1	2
	$\lambda_5 \cdot 10^{-5}$, 1/год.	0.06	0.10	0.12	0.07	0.09	0.06	0.10	0.12	0.07	0.09
t , год.		6000	5500	4500	5000	4000	6000	5500	4000	4500	5000

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до завдання 2.2.2

Параметри	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_1 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.23	0.21	0.22	0.25	0.24	0.21	0.23	0.22	0.24	0.25
$\lambda_2 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.05	0.06	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
$\lambda_3 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.4	0.3	0.2	0.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.5	0.6
$t, \text{ год.}$	500	550	600	400	450	520	580	430	470	600
Параметри	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\lambda_1 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.25	0.24	0.22	0.23	0.21	0.25	0.24	0.22	0.21	0.23
$\lambda_2 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.05	0.06	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
$\lambda_3 \cdot 10^{-3}, 1/\text{год.}$	0.3	0.2	0.6	0.5	0.2	0.4	0.3	0.6	0.2	0.4
$t, \text{ год.}$	600	470	430	580	520	450	400	600	550	500

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до завдання 2.2.3

Параметр	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/год.	1.33	1.25	1.41	1.27	1.39	1.35	1.29	1.37	1.31	1.41
t , год.	100	130	150	80	120	110	140	90	150	80
Параметр	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/год.	1.38	1.30	1.34	1.36	1.40	1.32	1.26	1.30	1.28	1.34
t , год.	80	150	90	140	110	120	80	150	130	100

Таблиця 2.4 – Вихідні дані до завдання 2.2.4

Параметри	В а р і а н т и									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	5000	4800	4600	5200	5400	5000	4800	4600	5200	5400
t , год.	10	12	14	8	16	16	8	14	12	10
$P_C^H(t)$, 1/год.	0.90	0.93	0.95	0.87	0.91	0.87	0.89	0.90	0.95	0.93
Параметри	В а р і а н т и									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
N	4000	4500	5000	6000	5500	4500	4000	6000	5000	5500
t , год.	13	11	9	15	15	9	13	11	9	13
$P_C^H(t)$, 1/год.	0.92	0.94	0.88	0.90	0.88	0.92	0.94	0.90	0.88	0.88

ДОДАТОК А

Значення функції e^{-x}

x	x									
	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
0.00	1.0000	0.9990	0.9980	0.9970	0.9960	0.9950	0.9940	0.9930	0.9920	0.9910
0.01	0.9900	0.9891	0.9881	0.9871	0.9861	0.9851	0.9841	0.9831	0.9822	0.9812
0.02	0.9802	0.9792	0.9782	0.9773	0.9763	0.9753	0.9743	0.9734	0.9724	0.9714
0.03	0.9704	0.9695	0.9685	0.9675	0.9666	0.9656	0.9646	0.9637	0.9627	0.9618
0.04	0.9608	0.9598	0.9588	0.9579	0.9570	0.9560	0.9550	0.9541	0.9531	0.9522
0.05	0.9512	0.9502	0.9493	0.9484	0.9474	0.9465	0.9455	0.9446	0.9436	0.9427
0.06	0.9418	0.9408	0.9399	0.9389	0.9380	0.9371	0.9361	0.9352	0.9343	0.9333
0.07	0.9324	0.9315	0.9305	0.9226	0.9287	0.9277	0.9258	0.9259	0.9250	0.9240
0.08	0.9231	0.9222	0.9213	0.9204	0.9194	0.9185	0.9176	0.9167	0.9158	0.9148
0.09	0.9139	0.9130	0.9121	0.9112	0.9103	0.9094	0.9085	0.9076	0.9066	0.9057
	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.9048	0.8958	0.8969	0.8781	0.8694	0.8607	0.8521	0.8437	0.8353	0.8270
0.2	0.8187	0.8106	0.8025	0.7945	0.7866	0.7788	0.7711	0.7634	0.7588	0.7483
0.3	0.7408	0.7334	0.7261	0.7189	0.7118	0.7047	0.6977	0.6907	0.6839	0.6771
0.4	0.6703	0.6637	0.6570	0.6505	0.6440	0.6376	0.6313	0.6250	0.6188	0.6126
0.5	0.6065	0.6005	0.5945	0.5886	0.5825	0.5769	0.5712	0.5655	0.5599	0.5543
0.6	0.5488	0.5434	0.5379	0.5326	0.5273	0.5220	0.5169	0.5117	0.5066	0.5016
0.7	0.4966	0.4916	0.4868	0.4819	0.4771	0.4724	0.4677	0.4630	0.4584	0.4538
0.8	0.4493	0.4449	0.4404	0.4360	0.4317	0.4274	0.4232	0.4190	0.4148	0.4107
	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09

0.9	0.4066	0.4025	0.3985	0.3946	0.3906	0.3867	0.3829	0.3791	0.3753	0.3716
1.0	0.3679	0.3642	0.3606	0.3570	0.3535	0.3499	0.3465	0.3430	0.3396	0.3362
1.1	0.3329	0.3296	0.3263	0.3230	0.3198	0.3166	0.3135	0.3104	0.3073	0.3042
1.2	0.3012	0.2982	0.2952	0.2923	0.2894	0.2865	0.2837	0.2808	0.2780	0.2753
1.3	0.2725	0.2698	0.2671	0.2645	0.2618	0.2592	0.2567	0.2541	0.2516	0.2491
1.4	0.2466	0.2441	0.2417	0.2393	0.2369	0.2346	0.2322	0.2299	0.2276	0.2254
1.5	0.2231	0.2209	0.2187	0.2165	0.2144	0.2122	0.2104	0.2080	0.2060	0.2039
1.6	0.2019	0.1999	0.1979	0.1959	0.1940	0.1920	0.1901	0.1882	0.1864	0.1845
1.7	0.1827	0.1809	0.1791	0.1773	0.1755	0.1738	0.1720	0.1703	0.1686	0.1670
1.8	0.1653	0.1637	0.1620	0.1604	0.1588	0.1572	0.1557	0.1541	0.1526	0.1511
1.9	0.1496	0.1481	0.1466	0.1451	0.1437	0.1423	0.1409	0.1395	0.1381	0.1367
2.0	0.1353	0.1340	0.1327	0.1313	0.1300	0.1287	0.1275	0.1262	0.1249	0.1237
2.2	0.1108	0.1097	0.1086	0.1075	0.1065	0.1054	0.1044	0.1033	0.1023	0.1013
2.3	0.1003	0.0993	0.0983	0.0973	0.0963	0.0954	0.0954	0.0935	0.0926	0.0916
2.4	0.907	0.0898	0.0889	0.0880	0.0872	0.0863	0.0854	0.0846	0.0837	0.0829
2.5	0.0821	0.0813	0.0805	0.0797	0.0789	0.0781	0.0773	0.0765	0.0758	0.0750
2.6	0.0743	0.0735	0.0728	0.0721	0.0714	0.0707	0.0699	0.0693	0.0686	0.0679
2.7	0.0672	0.0665	0.0659	0.0652	0.0646	0.0639	0.0633	0.0627	0.0620	0.0614
2.8	0.0608	0.0602	0.0596	0.0590	0.0584	0.0578	0.0573	0.0567	0.0561	0.0556
2.9	0.0550	0.0545	0.0539	0.0534	0.0529	0.0523	0.0518	0.0513	0.0508	0.0503
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
3	0.0498	0.450	0.0408	0.0368	0.0334	0.0302	0.0273	0.0247	0.0224	0.0200
4	0.0183	0.0166	0.0150	0.0136	0.0123	0.0111	0.0101	0.0091	0.0082	0.0074
5	0.0067	0.0061	0.0055	0.0050	0.0045	0.0041	0.0037	0.0033	0.0030	0.0027
6	0.0025	0.0022	0.0020	0.0018	0.0017	0.0015	0.0014	0.0012	0.0011	0.0010
7	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
8	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001