МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Інститут інноваційних технологій і змісту освіти
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

М. Д. Кошовий, В. І. Шевченко

НАДІЙНІСТЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник
для студентів напряму підготовки
«Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології»
вищих навчальних закладів

Харків «ХАІ» 2014

УДК 004.052(075.8)
ББК 32.97я731
К76

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Ю. В. Куц;
д-р техн. наук, проф. С. І. Кондрашов;
д-р техн. наук, проф. О. Г. Руденко

Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1/11-2292 від 11.02.2014)

Кошовий, М. Д.
К76 Надійність обчислювальних систем [Текст] : підруч. / М. Д. Кошовий, В. І. Шевченко. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2014. – 69 с.

ISBN 978-966-662-342-6

Подано теоретичні відомості, таблиці, графіки, розрахункові формули, завдання для самостійної роботи й приклади розв'язання найбільш складних задач. Розглянуто основи класичної теорії надійності, а також метрологічної надійності та надійності програмного забезпечення.

Для студентів напряму підготовки «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» вищих навчальних закладів, пов'язаного з обчислювальними системами, при вивченні теорії надійності.

Іл.: 10. Табл.: 22. Бібліогр.: 18 назв

УДК 004.052(075.8)
ББК 32.97я731

© Кошовий М. Д., Шевченко В. І., 2014

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2014

ISBN 978-966-662-342-6

ПЕРЕДМОВА

Мета підручника «Надійність обчислювальних систем» – допомогти студентам технічних вищих навчальних закладів, а також технічним фахівцям засвоїти основи теорії надійності й набути технічних навичок із оцінювання надійності різних технічних об'єктів. Під час розроблення підручника автори основну увагу приділяли його прикладному змісту.

Пропонований читачеві підручник «Надійність обчислювальних систем» містить теоретичні відомості, таблиці, графіки, розрахункові формули, що стосуються основ теорії надійності. Розглянуто класичну теорію надійності, а також метрологічну надійність і надійність програмного забезпечення.

Підручник також містить завдання для самостійної роботи й приклади розв’язання найбільш складних задач. Розділ починається з простих задач, а потім їх складність зростає. Розв’язання складних задач допоможе поглибити знання теорії й набути практичного досвіду в оцінюванні надійності об'єктів. В основному для задач наведено відповіді, які є наближеними. Майже всі задачі розроблено в двадцяти варіантах для великої групи студентів.

Виконання самостійної роботи дасть можливість студентам закріпити складний лекційний матеріал з теорії надійності й допоможе набути практичних навичок розрахунку надійності.

Оскільки автори ставили навчальні цілі і через те, що кількість завдань є обмеженою, завдання для самостійної роботи охоплюють насамперед основи класичної теорії надійності для технічних об'єктів.

Підручник також містить довідковий матеріал з надійності в додатках, контрольні запитання, список літератури з теорії надійності.

Терміни надійності, використані в цьому підручнику, визначено в системі стандартів «Надійність у техніці». На рис. П.1 показано місце показників надійності в загальній структурі якості об'єкта.

Автори вдячні всім, хто допомагав у виданні цього підручника й зробив критичні зауваження, які й було враховано.

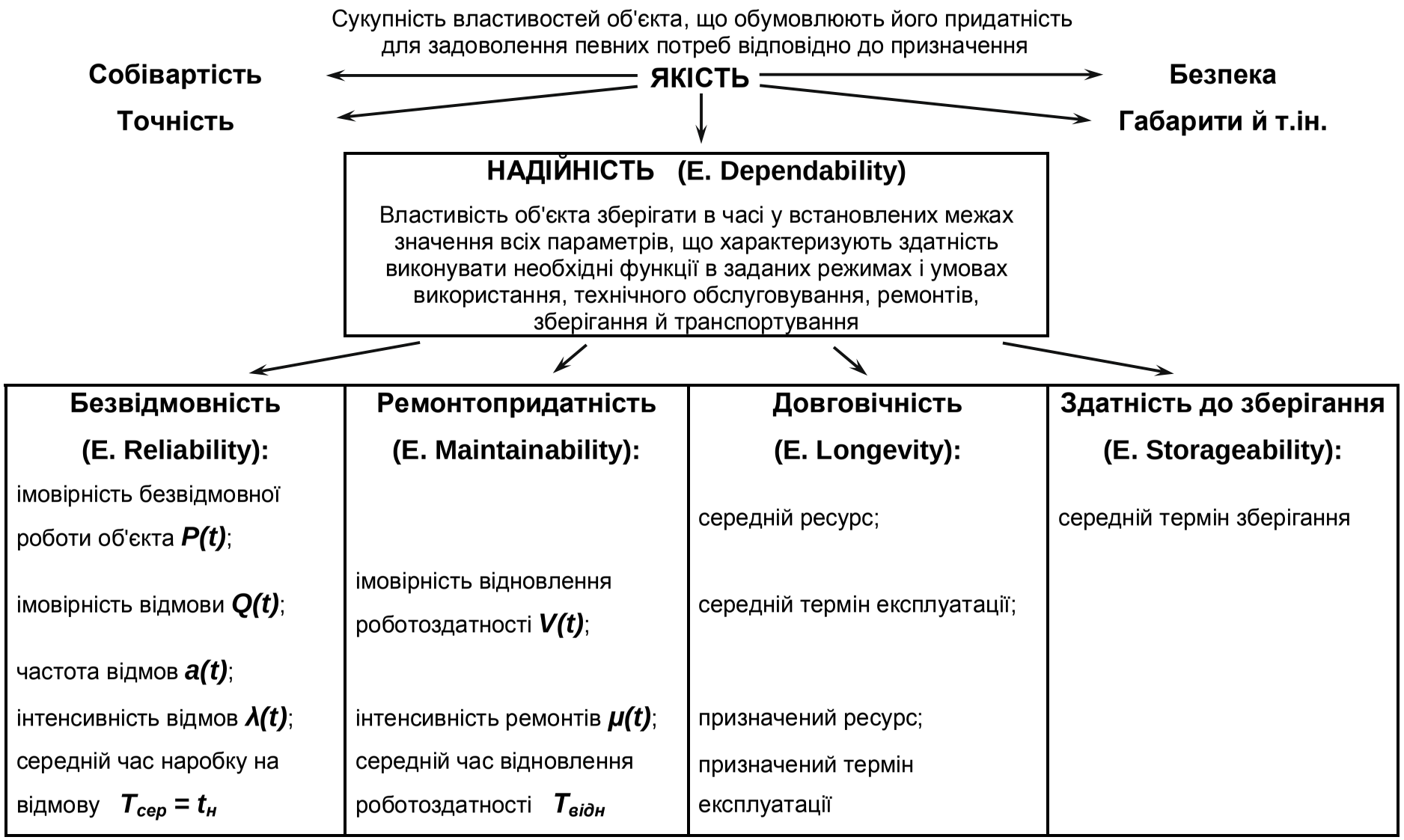


Рис. П.1. Місце показників надійності в загальній структурі якості об'єкта

Розділ 1. НАДІЙНІСТЬ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ І НЕРЕМОНТОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ. ПОКАЗНИКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ

Терміни надійності, використані в цьому підручнику, визначено в системі стандартів «Надійність у техніці».

Відмовою називають подію, що полягає в порушенні роботоздатного стану об'єкта.

У стандартах «Надійність у техніці» терміни «ремонтовний об'єкт» і «відновний об'єкт» різняться. Але ці відмінності є незначними, і в межах дослідження основ теорії надійності ними знехтуємо.

Відновними, або ремонтовними, будемо називати об'єкти, які протягом терміну виконання їх функцій можна відремонтувати. При відмові такого об'єкта виконувана операція може продовжитися після усунення відмови. Приклади таких об'єктів – верстати, автомобілі, літаки, телевізори, комп'ютери.

Невідновними, або неремонтовними, будемо називати об'єкти, які протягом терміну виконання їх функцій неможливо відремонтувати. При відмові такого об'єкта виконувана операція переривається, і її необхідно повторювати після усунення відмови. Приклади таких об'єктів – штучні супутники Землі, ракети й снаряди, засоби вимірювання, системи управління виробничими процесами.

Резервуванням називають використання додаткових засобів або можливостей з метою збереження роботоздатного стану об'єкта при відмові одного або декількох його елементів.

Такі показники, як імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і ймовірність відмов $Q(t)$, найдоцільніше використовувати для складних об'єктів, особливо резервованих. Ці показники можна просто розрахувати в процесі проектування, а також легко оцінити під час випробування реальних об'єктів.

Частота відмов $a(t)$ є найповнішою характеристикою безвідмовності об'єктів. Цей показник являє собою щільність розподілу ймовірності і містить всю інформацію про випадкову величину – час безвідмовної роботи.

Для характеристики безвідмовності об'єктів найзручніше використовувати інтенсивність відмов $\lambda(t)$, тому що цей показник з функції часу можливо звести до константи. Це дає можливість спростити розрахунки й визначати надійність складних систем, знаючи надійність елементів, з яких складаються ці системи.

Середній час наробку на відмову $T_{сер}$ характеризує безвідмовність об'єктів просто й наочно. Але недолік цього показника полягає в складності його застосування для теоретичних розрахунків та обмеженості використання – лише для нерезервованих й неремонтованих елементів,

наприклад простих елементів систем.

З огляду на теорію надійності найпростішими об'єктами можна вважати нерезервовані й неремонтовані вироби та елементи виробів. Розглянемо показники безвідмовності для цих виробів.

Наведемо приклади середнього часу наробку на відмову для широко відомих виробів:

– молоток: $T_{сер} \approx$ 20 років/ на відмову, $\lambda \approx \frac{1}{T_{сер}} =$ = 0,05 відмови/ за рік;

– мобільний телефон: $T_{сер} \approx$ 2 роки/ на відмову, $\lambda \approx$ 0,5 відмови/ за рік;

– комп'ютер: $T_{сер} \approx$ 2 місяці/ на відмову, $\lambda \approx$ 0,5 відмови/ за місяць;

– автомобіль: $T_{сер} \approx$ 2 тижні/ на відмову, $\lambda \approx$ 0,5 відмови/ за тиждень;

– літак: $T_{сер} \approx$ 20 годин/ на відмову, $\lambda \approx$ 0,05 відмови/ за годину.

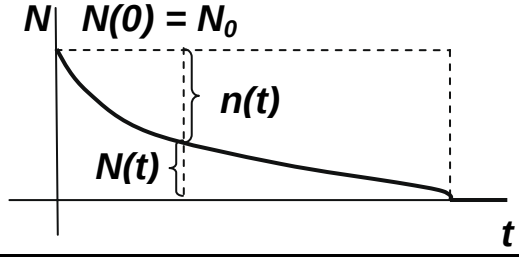
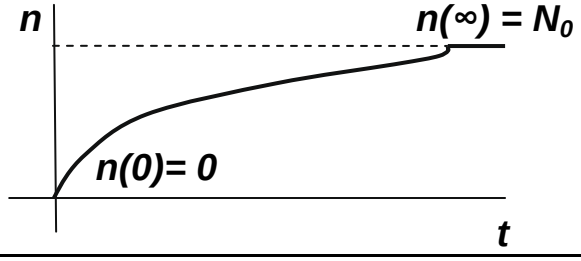
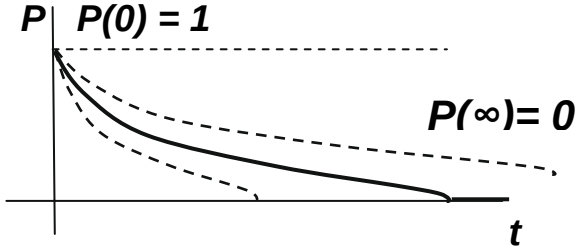
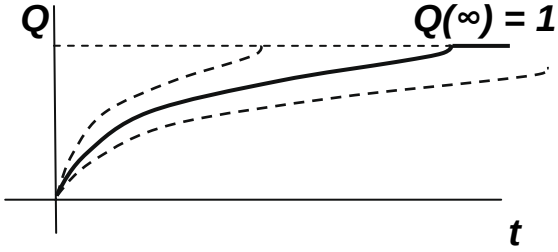
У табл. 1.1 наведено визначення й властивості показників безвідмовності нерезервованих й неремонтованих об'єктів, які зведено парами так, що їх зручно порівнювати між собою.

Оскільки показники ***P, Q, a, λ*** стосуються однієї властивості об'єкта – безвідмовності, то логічно передбачити, що вони є взаємозалежними, і залежність між ними легко визначити і за графічними ілюстраціями, і за математичними формулами (табл. 1.2, рис. 1.1).

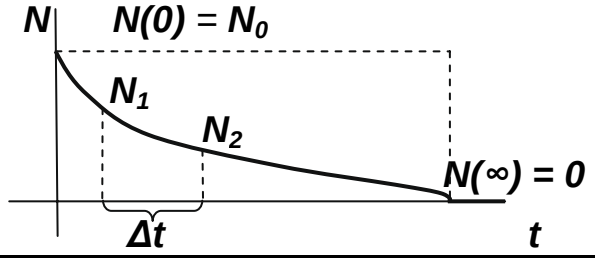
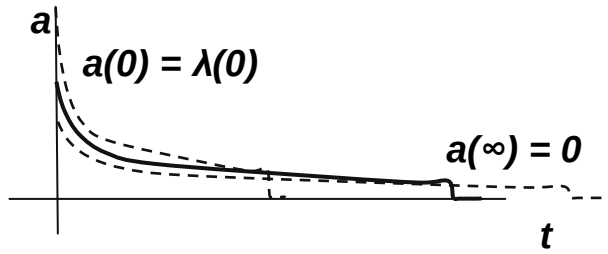
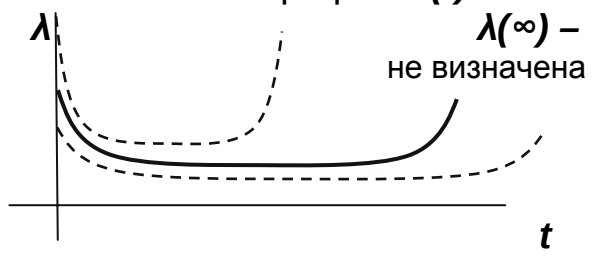
Навіщо ж використовувати таку кількість показників безвідмовності об'єктів, якщо їх можна визначити один із одного? Відповідь проста: для різних розрахунків безвідмовності об'єктів простіше й зручніше використовувати різні показники. А ще вибір показника безвідмовності, яким зручно користуватися під час оцінювання надійності об'єкта, залежить від об'єкта.

Таблиця 1.1

Показники безвідмовності, визначення та властивості

Імовірність безвідмовної роботи *P(t)*	**Імовірність відмови *Q(t)***
Імовірність безвідмовної роботи ***P(t)*** – імовірність такої події, коли при заданих умовах експлуатації в заданий інтервал часу не станеться жодної відмови: $P(t) = P(T > t)$, де ***t*** – поточний час; ***T*** – час наробку об'єкта від початку роботи до відмови	Імовірність відмови ***Q(t)*** – імовірність такої події, коли час до відмови є меншим, ніж поточний час: $Q(t) = P(T \le t)$, де ***t*** – поточний час; ***T*** – час наробку об'єкта від початку роботи до відмови
Статистичне визначення: $P(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$, де ***t*** – поточний час; ***N(t)*** – кількість об'єктів, що були справними до моменту часу ***t***; ***n(t)*** – кількість об'єктів, що відмовили до моменту часу ***t***	Статистичне визначення: $Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}$, де ***t*** – поточний час; ***n(t)*** – кількість об'єктів, що відмовили до моменту часу ***t***; N_0 – кількість об'єктів на початку випробування
Графік кількості справних об'єктів ***N(t)***  	Графік кількості об'єктів, що відмовили, ***n(t)*** 
Типовий графік ***P(t)***  	Типовий графік ***Q(t)*** 
Область визначення $0 \le P(t) \le 1$	Область визначення $0 \le Q(t) \le 1$
P(t) – ніколи не зростає	***Q(t)*** – ніколи не спадає
Розмірність: ***P(t)*** – безрозмірна величина, ***P(t)***·*100%* – у процентах	Розмірність: ***Q(t)*** – безрозмірна величина, ***Q(t)***·*100%* – у процентах
Взаємозалежність $P(t) = 1 - Q(t)$	Взаємозалежність $Q(t) = 1 - P(t)$

Закінчення табл. 1.1

Частота відмов *a(t)*	**Інтенсивність відмов *λ(t)***
Частота відмов ***a(t)*** – щільність імовірності часу роботи об'єктів до першої відмови – відношення швидкості відмов до початкової кількості об'єктів: $a(t) = \frac{n(t)'}{N_0} = \frac{\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta n}{\Delta t}}{N_0} \approx \frac{\Delta n}{N_0 \Delta t}$, де $\Delta n = n(t+\Delta t) - n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили протягом періоду часу Δt; N_0 – кількість об'єктів на початку випробування	Інтенсивність відмов ***λ(t)*** – щільність імовірності часу роботи об'єктів до першої відмови – відношення швидкості відмов до кількості об'єктів, що справно працюють: $\lambda(t) = \frac{n(t)'}{N_{сер}} = \frac{\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta n}{\Delta t}}{N_{сер}} \approx \frac{\Delta n}{N_{сер} \Delta t}$, де $n(t)' \approx \frac{\Delta n}{\Delta t}$ – швидкість відмов; $N_{сер}$ – середня кількість об'єктів, що працювали протягом періоду часу Δt
Графік кількості об'єктів ***N(t)***  	$N_1 - N_2 = \Delta N = \Delta n$ Розрахунок $N_{сер}$: $N_{сер} = \frac{N_1 + N_2}{2}$
Типовий графік ***a(t)***  	Типовий графік ***λ(t)*** 
Область визначення $a(t) \geq 0$	Область визначення $\lambda(t) \geq 0$
Розмірність: $[a] = \frac{\text{Кількість відмов}}{[t]} = \frac{1}{[t]}$ (за годину, за місяць, за рік)	Розмірність: $[\lambda] = \frac{\text{Кількість відмов}}{[t]} = \frac{1}{[t]}$ (за годину, за місяць, за рік)
Площа $\int_0^{+\infty} a(t)dt = Q_{max} = 1$	Площа $\int_0^{+\infty} \lambda(t)P(t)dt = 1$
Взаємозалежність: $a(t) = \frac{d}{dt} Q(t)$; $a(t) = \lambda(t) \cdot P(t)$, $P(0) = 1$ $\Rightarrow$ $a(0) = \lambda(0)$	Взаємозалежність: $\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$; $P(\infty) = 0 \Rightarrow \lambda(\infty)$ – не існує

Таблиця 1.2

Взаємозалежність показників безвідмовності об'єкта

Основи взаємозалежності показників:

$$\lambda = \frac{a}{P} \qquad a = \frac{dQ}{dt} \qquad P = e^{-\int_0^t \lambda dt} \qquad Q = 1 - P$$

Показники безвідмовності	Визначення	Залежність від відповідного показника			
		$P(t)$	$Q(t)$	$a(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	$\frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$	1	$1 - Q(t)$	$1 - \int_0^t a(t)dt$	$e^{-\int \lambda dt}$
$Q(t)$	$\frac{n(t)}{N_0}$	$1 - P(t)$	1	$\int_0^t a(t)dt$	$1 - e^{-\int \lambda dt}$
$a(t)$	$\frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N_0}$	$-\frac{d}{dt}P(t)$	$\frac{d}{dt}Q(t)$	1	$\lambda(t) \cdot e^{-\int \lambda dt}$
$\lambda(t)$	$\frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N_{cep}}$	$\frac{a}{P} = \frac{\frac{d}{dt}P(t)}{P(t)}$	$\frac{a}{P} = \frac{\frac{d}{dt}Q(t)}{1 - Q(t)}$	$\frac{a}{P} = \frac{a(t)}{1 - \int_0^t a(t)dt}$	1
T_{cep}	$\frac{\sum_{i=1}^{N_0} T_i}{N_0}$	$\int_0^{+\infty} P(t)dt$	$\int_0^{+\infty} (1-Q(t))dt$	$\int_0^{+\infty} ta(t)dt$	$\int_0^{+\infty} e^{-\int \lambda dt} dt$

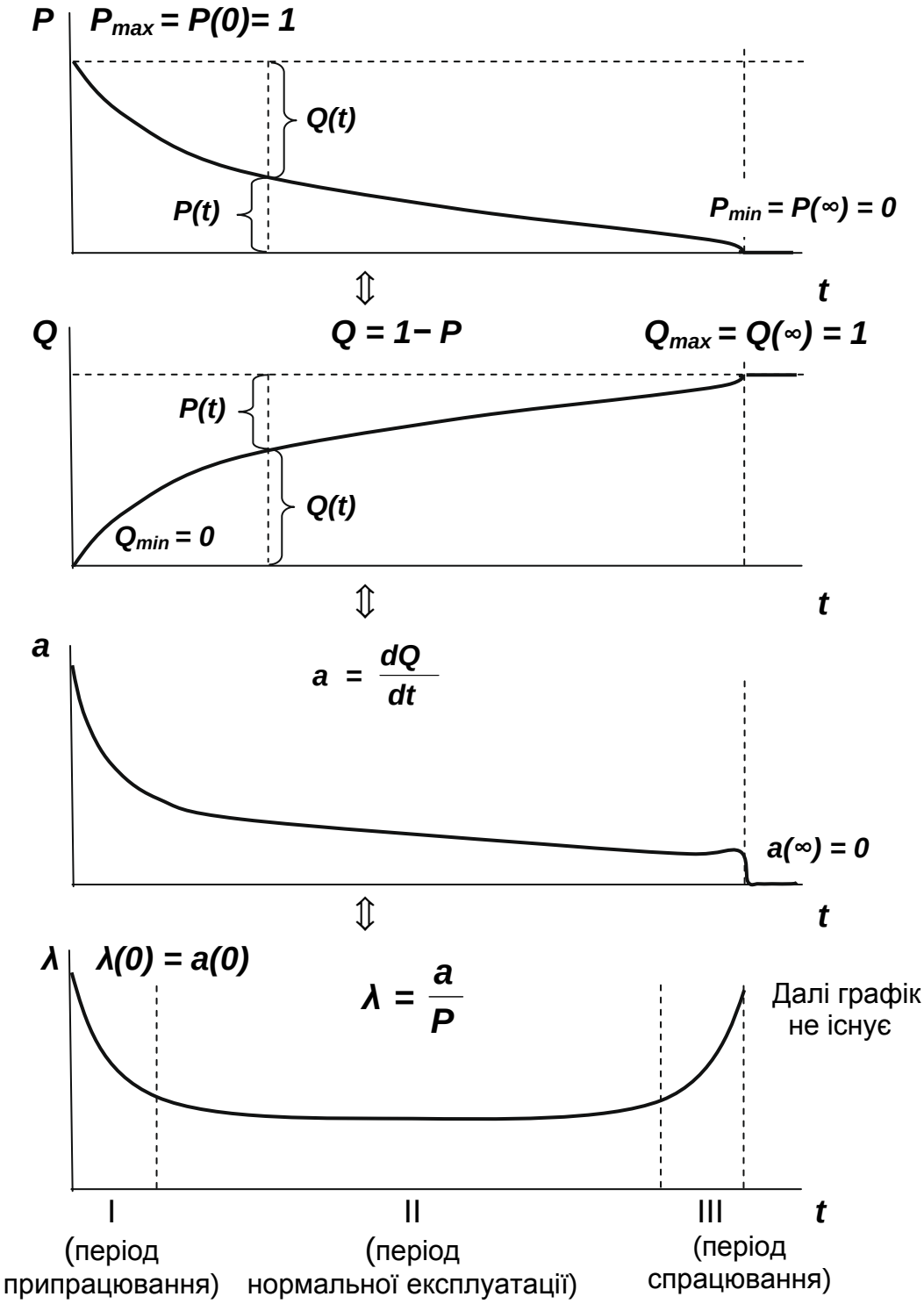


Рис. 1.1. Взаємозалежність показників безвідмовності об'єкта ***P, Q, a, λ***

Розділ 2. СПРОЩЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ – ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНА МОДЕЛЬ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБ'ЄКТА

У цьому розділі розглянемо основний постулат класичної теорії надійності. Часто вважають, що інтенсивність відмов об'єктів є величиною сталою. Насправді це майже завжди не є істиною, а тільки спрощеною моделлю.

Можна виділити три інтервали часу роботи, що є характерними для типового технічного виробу (рис. 2.1):

– період припрацювання;

– період нормальної експлуатації;

– період спрацювання.

Це й означає, що для типового технічного виробу інтенсивність відмов майже ніколи не є константою.

Що ж спонукає нас прийняти в класичній теорії надійності постулат, який не є істиною? А те, що цей постулат сприяє різкому спрощенню розрахунків надійності об'єктів і наочності результатів цих розрахунків, адже і початкові величини, і підсумкові результати – інтенсивності відмов елементів і виробів – не є функціями часу, а є числами.

Наведемо формули, які є характерними для експоненціальної моделі надійності:

$$\lambda = const \quad \Rightarrow \int_0^t \lambda dt = \lambda \cdot t \quad \Rightarrow P = e^{-\int \lambda dt} = e^{-\lambda \cdot t} \quad \Rightarrow a = P \cdot \lambda = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t};$$

$$T_{сер} = \frac{1}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{1}{T_{сер}} .$$

Ці формули не можуть бути такими простими для реального об'єкта.

Проаналізувавши графіки, можна переконатися, що експоненціальна модель є достатньо адекватною, близькою до прикладів реальних виробів. На рис. 2.1 графіки показників безвідмовності для прикладу реального виробу зображено пунктирною лінією, а графіки відповідних показників для експоненціальної моделі – суцільною. Добре видно, як мало вони різняться.

У табл. 2.1 наведено показники безвідмовності – інтенсивність відмов $\lambda(t)$ і середній час наробку на відмову $T_{сер}$ – для поширених елементів приладів, обчислювальних і вимірювальних систем.

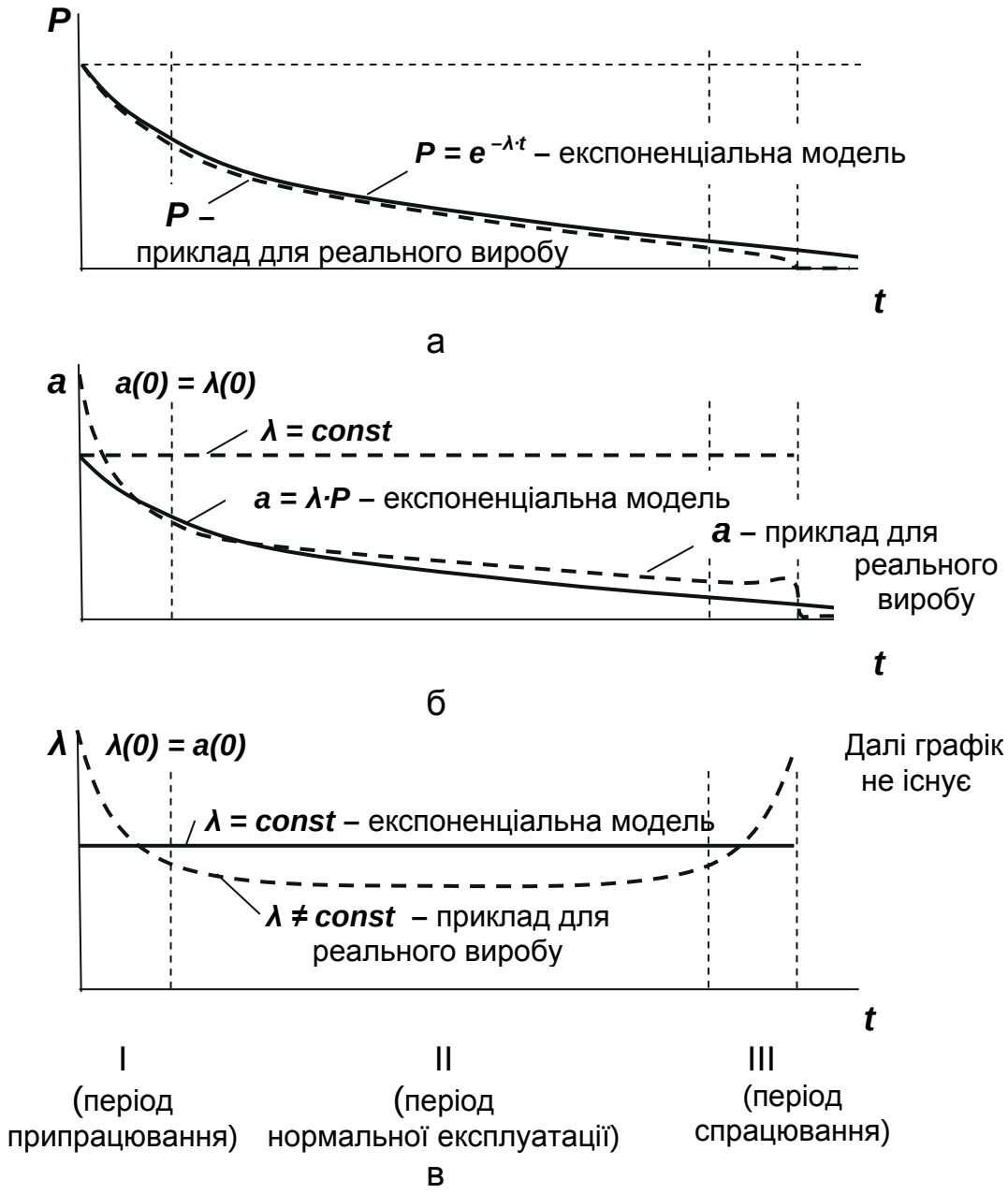


Рис. 2.1. Експоненціальна модель безвідмовності об'єкта:
а – модель імовірності безвідмовної роботи – експонента;
б – модель частоти відмов – експонента;
в – модель інтенсивності відмов – константа

Таблиця 2.1

Спрощення теорії надійності –
безвідмовність поширених елементів виробів

Приклади радіоелементів	**Приклади механічних елементів**	**Інтенсивність відмов λ, середній час наробку $T_{сер} = 1/\lambda$**
Окремі інтегральні елементи – резистори, діодні та транзисторні переходи, електричне з'єднання зварюванням	Шайби	Надвисока надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-9}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 100000 років/ на відмову
Дискретні РЕ (окремі діоди, резистори, транзистори, конденсатори малого номіналу), прості інтегральні мікросхеми, якісні промислові з'єднання паянням	Окремі елементи приладів, що працюють без механічного навантаження: зуб, кулачок, палець, защіпка	Висока надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-8}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 10000 років/ на відмову
Середні ІМС, дискретні РЕ (конденсатори, діоди, транзистори), тумблери, геркони, з'єднання паянням	Ненавантажені підшипники кочення, ненавантажені зубчасті передачі	Середньовисока надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-7}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 1000 років/ на відмову
Великі ІМС і МП, електричні рознімні з'єднання (один контакт), дроти під навантаженням	Підшипники кочення, безколекторні електромашини, пружини	Середня надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-6}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 100 років/ на відмову
Запобіжники, акумулятори малого розміру, багатоконтактні рознімні з'єднання (золоті)	Електромеханічні реле, невеликі колекторні електродвигуни	Середньонизька надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 10 років/ на відмову
Електрорадіолампи, електролітичні конденсатори	Електромеханічні реле, потужні колекторні електродвигуни, гіроскопи	Низька надійність: $\lambda = 1 \cdot 10^{-4}$ відм./год, $T_{сер} \approx$ 1 рік/ на відмову
Складні електромеханічні пристрої – стільниковий телефон, комп'ютер, автомобіль, літак і т.ін.		Наднизька надійність: $\lambda > 1 \cdot 10^{-3}$ відм./год, $T_{сер} <$ 1 місяць/ на відмову

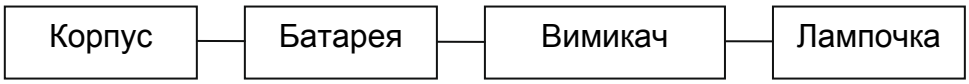
Розділ 3. ПРИКЛАДИ ЗМІНЕННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ВИРОБІВ ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАДІЙНОСТІ

Особливість побудови структурних схем виробів з огляду на теорію надійності – завжди послідовне з'єднання елементів виробу, відмова яких може призвести до відмови всього виробу (рис. 3.1).

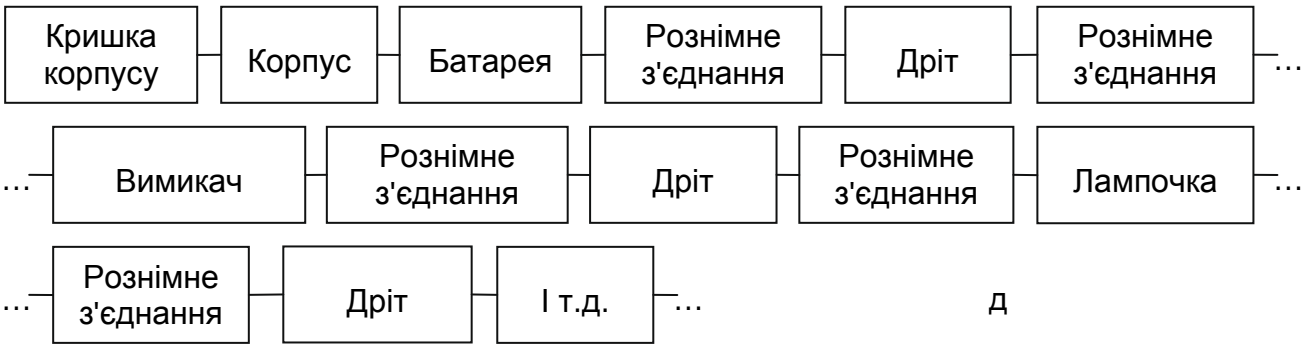
Приклад 1. Виріб – електричний кишеньковий ліхтарик

а б

в



г



д

Рис. 3.1. Схеми електричного кишенькового ліхтарика:
а – електрична принципова; б – електрична монтажна; в – електрична функціональна структурна; г – структурна з огляду на надійність; д – більш складний приклад структурної схеми з огляду на надійність

Із такого послідовного підключення ланок у схемах надійності випливає два важливих висновки у вигляді математичних формул:

– висновок 1 – $$\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i ;$$

$$\Updownarrow$$

– висновок 2 – $$P_\Sigma = P_1 P_2 \ldots P_n = \prod_{i=1}^{n} P_i ,$$

$$e^{\lambda_\Sigma} = e^{\lambda_1} e^{\lambda_2} \ldots e^{\lambda_n} = e^{\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n} .$$

А в другому прикладі розглянуто випадок, коли у структурній схемі виробу елементи можуть бути з'єднані паралельно. Це з'єднання є характерним для резервних елементів, відмова яких може й не призвести до відмови всього виробу (рис. 3.2).

Приклад 2. Виріб – комп'ютер

а

б

в

Рис. 3.2. Схеми комп'ютера: а – функціональна; б – нерезервована структурна; в – резервована структурна

Розділ 4. ВИДИ РОЗРАХУНКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ДЛЯ СКЛАДНИХ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ І НЕРЕМОНТОВАНИХ ВИРОБІВ

Розрізняють три види розрахунку безвідмовності для нерезервованих і неремонтованих виробів: приблизний, орієнтовний та уточнений. Принципи цих розрахунків для порівняння наведено в табл. 4.1. Головний і загальний принцип усіх цих розрахунків полягає в застосуванні експоненціальної моделі надійності для всіх елементів і виробу в цілому – інтенсивність відмов всіх елементів виробу не змінюється з часом:

$$\lambda_i = const \neq \lambda_i(t) \text{ для всіх } i \quad \Rightarrow \quad \lambda_\Sigma = const .$$

Далі наведено три приклади застосування цих розрахунків.

Приклад 1. Прості розрахунки безвідмовності комп'ютера

Проведемо найпростіші з розрахунків безвідмовності – приблизний та орієнтовний. Відмова одного елемента призводить до відмови всього виробу, тобто всі елементи структурної схеми з огляду на надійність з'єднано послідовно:

Приблизний розрахунок відрізняється тим, що всі елементи виробу є рівнонадійними:

$$\lambda_i = \lambda_Д = \lambda_{СБ} = \lambda_{КЛ} = \lambda_М \approx 1{,}5 \ \frac{\text{відмови}}{\text{за рік}}$$

Цей принцип суттєво спрощує приблизний розрахунок:

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{4} \lambda_i = 4\lambda_i = 4 \cdot 1{,}5 \frac{\text{відмови}}{\text{за рік}} = 6 \ \frac{\text{відм.}}{\text{рік}} .$$

Орієнтовний розрахунок відрізняється тим, що тільки однотипні елементи виробу є рівнонадійними. Це дещо ускладнює орієнтовний розрахунок:

$$\lambda_Д \neq \lambda_{СБ} \neq \lambda_{КЛ} \neq \lambda_М ;$$

$$\lambda_Д = \frac{1}{4} \frac{\text{відмова}}{\text{роки}}; \ \lambda_{СБ} = \frac{1}{2} \frac{\text{відмова}}{\text{роки}}; \ \lambda_{КЛ} = \frac{1}{1} \frac{\text{відмова}}{\text{рік}}; \ \lambda_М = \frac{4}{1} \frac{\text{відмови}}{\text{рік}} ;$$

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{4} \lambda_i = \lambda_Д + \lambda_{СБ} + \lambda_{КЛ} + \lambda_М = \frac{1}{4} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{4}{1} \approx 6 \ \frac{\text{відм.}}{\text{рік}}$$

Таблиця 4.1

Види розрахунків безвідмовності. Принципи для порівняння

	Приблизний	**Орієнтовний**	**Уточнений**
1	Експоненціальна модель надійності для всіх елементів і виробу в цілому – інтенсивність відмов усіх елементів виробу не змінюється з часом: $\lambda_i = const \neq \lambda_i(t)$ для всіх $i \Rightarrow \lambda_\Sigma = const$		
2	Усі елементи виробу експлуатуються при нормальних умовах (наприклад, температура 20 ºС, тиск 760 мм рт. ст., вологість 80 %, нормальне положення корпусу, відсутність вібрацій, ударів, зовнішніх електромагнітних полів і випромінювань): $\lambda_i = \lambda_{i0}$		Елементи експлуатуються в різних умовах: $\lambda_i \neq \lambda_0$
3	Відмова одного елемента спричиняє відмову всього виробу: $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$		Не завжди відмова елемента спричиняє відмову всього виробу, а може спричинити лише, наприклад, змінення зовнішнього вигляду, зниження точності, безпеки, здатності до зберігання, зручності експлуатації: $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{k \leq n} \lambda_i$
4	Усі елементи виробу є рівнонадійними: $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i0} = n \cdot \lambda_0$	Тільки однотипні елементи є рівнонадійними: $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i0} \neq n \cdot \lambda_0$	Інтенсивність відмов елементів залежить від різних факторів експлуатації, залежності від цих фаторів відомі, наприклад: $\lambda_i = K_{мех} \cdot K_{ел} \cdot K_{клім} \cdot \lambda_{i0}$

Приклад 2. Уточнений розрахунок безвідмовності системного блока комп'ютера

Інтенсивність відмов системного блока при нормальних умовах експлуатації (рис. 4.1):

$$\lambda_{СБ} = \frac{1}{2}\ \frac{\text{відмова}}{\text{роки}} = 0{,}5\ \frac{\text{відм.}}{\text{рік}} = \lambda_0 .$$

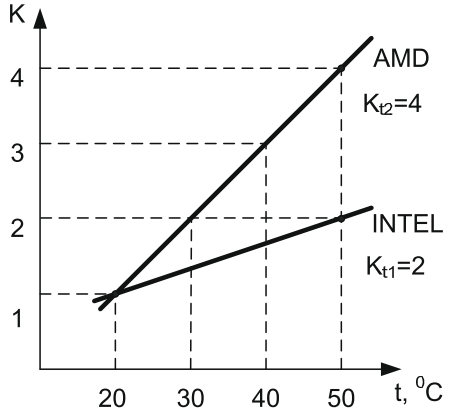


Рис. 4.1. Залежність інтенсивності відмов системного блока комп'ютера від температури

Інтенсивність відмов системного блока при роботі в умовах підвищеної температури з урахуванням поправкового коефіцієнта:

$$\lambda_{СБ\ INTEL} = K_{t1} \cdot \lambda_0 = 2\lambda_0 ; \qquad \lambda_{СБ\ AMD} = K_{t2} \cdot \lambda_0 = 4\lambda_0 ;$$

$$\lambda_{\Sigma} = K_{t1} \cdot \lambda_{\Sigma 0} ; \qquad \lambda_{\Sigma} = K_{t2} \cdot \lambda_{\Sigma 0} .$$

Приклад 3. Уточнений розрахунок безвідмовності освітлювальної лампочки

Безвідмовність лампочки визначається інтенсивністю відмов λ_0 .

Проте з практики відомо, що освітлювальна лампочка розжарювання, що працює цоколем униз, працює удвічі довше, ніж цоколем уверх. Це означає таке:

Лампочка розжарювання цоколем униз –

базова інтенсивність відмов:

$\lambda_1 = K_1 \cdot \lambda_0 = 1\lambda_0$.

Лампочка розжарювання цоколем уверх –

інтенсивність відмов удвічі більша:

$\lambda_2 = K_2 \cdot \lambda_0 = 2\lambda_0$.

Перелік факторів, що враховуються під час уточненого розрахунку безвідмовності, наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Фактори щодо уточненого розрахунку безвідмовності

Конструктивні	Виробничі	Експлуатаційні	
		Об'єктивні	Суб'єктивні
Конструктивне рішення Вибір варіанта функціональної, принципової електричних схем Вибір типів елементів Вибір режимів роботи схеми й елементів Стандартизація елементів, вузлів, блоків Якість розроблення технічної документації Організація служби з надійності на етапі конструювання виробів	Контроль якості елементів і матеріалів від суміжних підприємств Удосконалення технологічного процесу Контроль окремих операцій Контроль якості продукції, що випускається Організація служби з надійності на етапі виробництва	Кліматичні: тепло, холод тиск вологість атмосферна й контактна корозія Електромагнітні: електромагнітне випромінювання радіаційне випромінювання (у тому числі сонячне) Механічні: пил, пісок механічні навантаження удари нахили корпусу старіння і зношення біологічне середовище (мошва, мурашки, таргани, миші)	Кваліфікація особового складу Організація технічного обслуговування Організація служби зі збирання й аналізу інформації про відмови Організація зберігання й транспортування Рівень раціоналізаторської й винахідницької роботи

Розділ 5. НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

Терміни надійності, використані в цьому підручнику, визначено в системі стандартів «Надійність у техніці».

Відмовою називають подію, що полягає в порушенні роботоздатного стану об'єкта.

Резервуванням називають використання додаткових засобів або можливостей з метою збереження роботоздатного стану об'єкта при відмові одного або декількох його елементів.

Резервом, або надлишком, називають сукупність додаткових засобів або можливостей, що використовуються для резервування.

Основним елементом називають елемент об'єкта, який є необхідним для виконання об'єктом потрібних функцій за відсутності відмов його елементів.

Резервним елементом називають елемент об'єкта, призначений для виконання функцій основного елемента в разі відмови останнього.

Загальним резервуванням називають метод підвищення надійності об'єкта, коли резервується об'єкт в цілому.

Роздільним резервуванням називають метод підвищення надійності об'єкта, коли резервуються окремі елементи об'єкта.

Одним із основних параметрів резервування є його кратність. Розрізняють резервування з цілою й дробовою кратністю.

У табл. 5.1 наведено математичні моделі для тривіальних схем резервування, що дає можливість наочно порівняти ці схеми.

На рис. 5.1 зображено типові графіки ймовірності безвідмовної роботи об'єктів із різними схемами підключення ланок.

У табл. 5.2 наведено класифікацію видів резервів.

У табл. 5.3 наведено математичні моделі для типових схем резервів.

У табл. 5.4 наведено й проілюстровано особливості розрахунку безвідмовності резервованих систем у порівнянні з використанням експоненціальної моделі.

Спрощеним математичним апаратом, характерним для експоненціальної моделі, допускається користуватися для резервованих виробів у трьох випадках:

– для окремих елементів виробів;

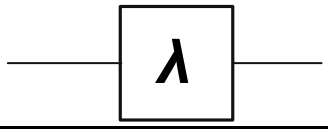
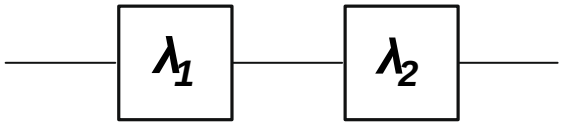
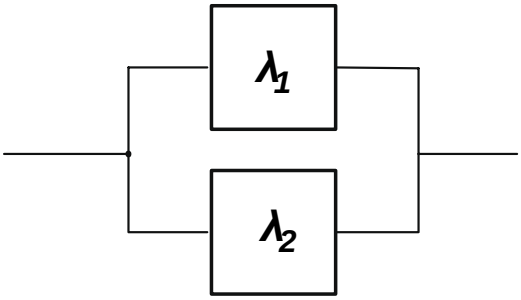
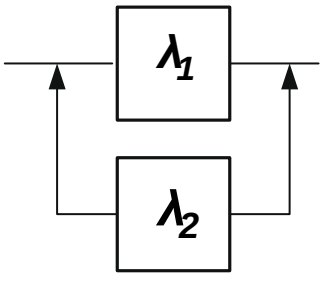
– для ділянок структурних схем з послідовно підключеними елементами;

– для орієнтовних розрахунків безвідмовності всього виробу з великою погрішністю.

У розділі 9 «Приклади розв’язання задач» наведено приклад розрахунку безвідмовності резервованого виробу.

Таблиця 5.1

Порівняльна таблиця тривіальних схем резервування

Схема з'єднання елементів	Математичний апарат
Окремий елемент  	$\lambda = \text{const} \Rightarrow T_{сер} = \frac{1}{\lambda}$; $\Downarrow$ $P = e^{-\lambda \cdot t}$; $Q = 1 - P$
Послідовна схема з'єднання елементів без резерву  Наприклад: лампочка з вимикачем, автомобіль з водієм, системний блок комп'ютера з монітором	$P_\Sigma = P_1 \cdot P_2 \Rightarrow Q_\Sigma = 1 - P_\Sigma$; $P_\Sigma = P_1 \cdot P_2 = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} =$ $= e^{-\lambda_1 t - \lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = e^{-\lambda_\Sigma t}$; $\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2 \Rightarrow T_\Sigma = \frac{1}{\lambda_\Sigma}$; якщо $\lambda_1 = \lambda_2$, $T_1 = T_2$, то $\lambda_\Sigma = 2\lambda_1 = const$, $T_\Sigma = 0{,}5T_1$
Гарячий резерв  Наприклад: дві фари, два двигуни літака, два поршні двигуна, два ока, дві руки людини	$Q_\Sigma = Q_1 \cdot Q_2 \Rightarrow P_\Sigma = 1 - Q_\Sigma$; $\Downarrow$ $P_\Sigma = e^{-\int \lambda dt} \neq e^{const \cdot t}$; $\Downarrow$ $const \neq \lambda_\Sigma \neq \frac{1}{T_\Sigma}$; якщо $\lambda_1 = \lambda_2$, $T_1 = T_2$, то $\lambda_\Sigma \neq const$, $T_\Sigma = 1{,}5T_1$
Холодний резерв  Наприклад: запчастина, запасне колесо автомобіля	$T_\Sigma = T_1 + T_2$; $P_\Sigma = P_{сер} \cdot (1 - \ln P_{сер})$, де $P_{сер} = (P_1 + P_2)/2$; $P_\Sigma = e^{-\int \lambda dt} \neq e^{const \cdot t}$; $const \neq \lambda_\Sigma \neq \frac{1}{T_\Sigma}$; якщо $\lambda_1 = \lambda_2$, $T_1 = T_2$, то $\lambda_\Sigma \neq const$, $T_\Sigma = 2T_1$

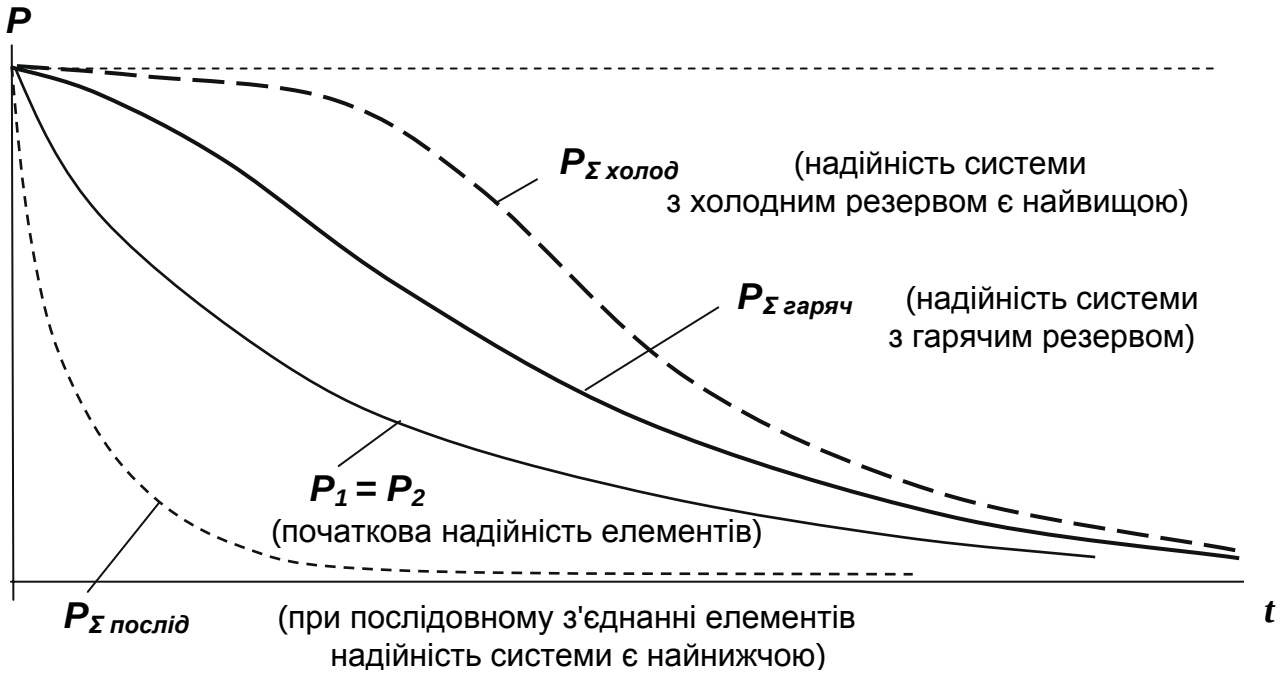


Рис. 5.1. Порівняння графіків імовірності безвідмовної роботи резервованих об'єктів із різними схемами з'єднання ланок

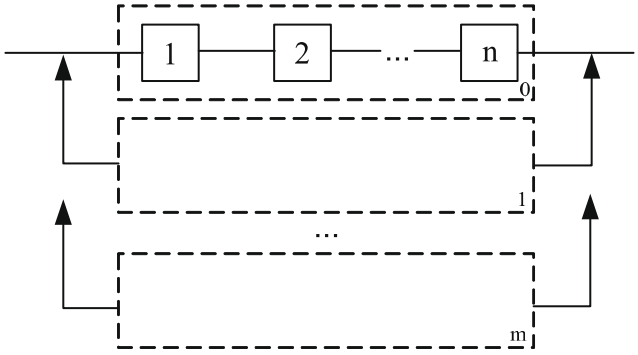
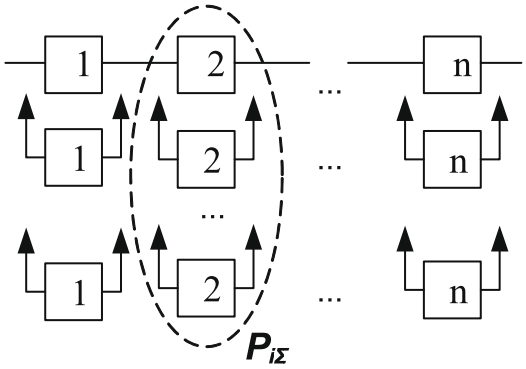
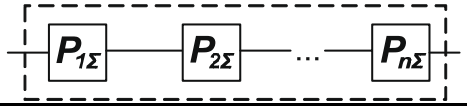
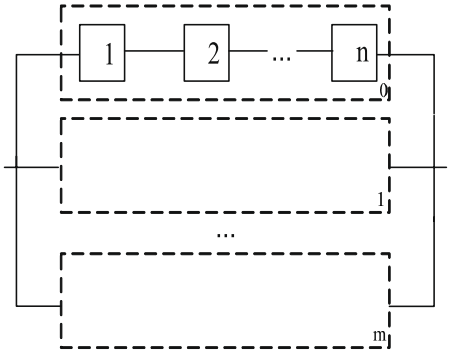
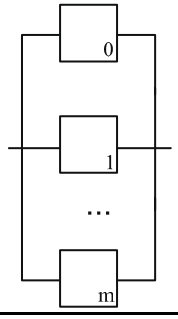
Таблиця 5.2

Види резервів

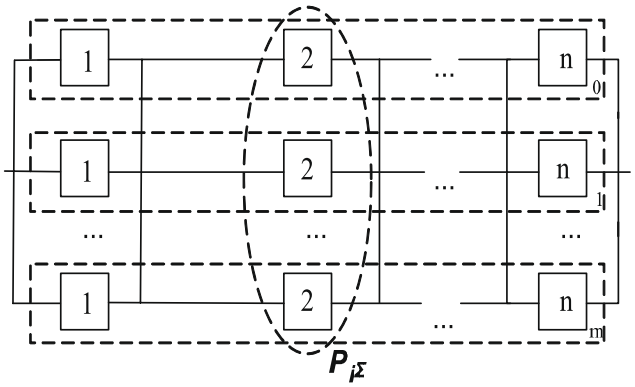
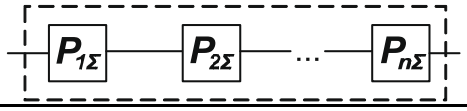
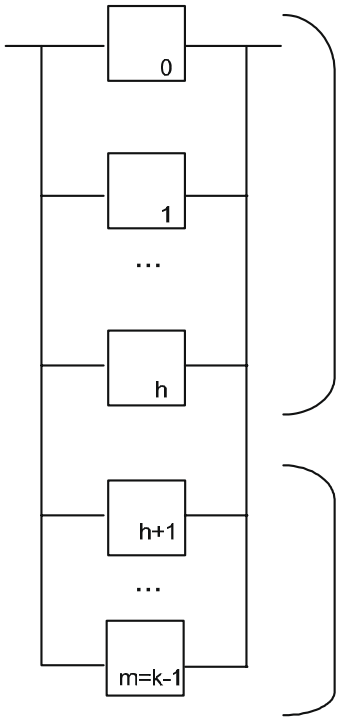
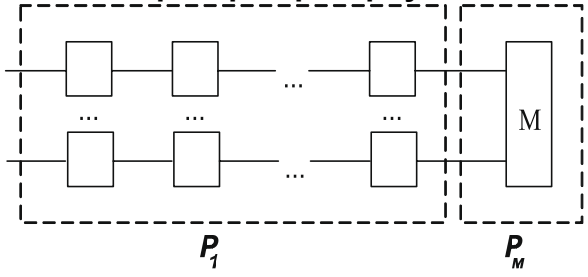
Ознака класифікації	**Назва резерву**
Режим роботи резерву	Навантажений (гарячий); ненавантажений (холодний); полегшений (теплий)
Вид резерву	Структурний; часовий; інформаційний; функціональний
Ступінь резервування	Загальний; роздільний
Кратність резерву	Резерв з цілою кратністю; резерв з дробовою кратністю: кратність резерву $K = \frac{N_{ре}}{N_{ое}}$, де $N_{ре}$ – кількість резервних елементів; $N_{ое}$ – кількість основних елементів
Можливість відновлення (ремонту) резерву	Невідновний; відновний; частково відновний

Таблиця 5.3

Математичні моделі типових схем резервування

Схема резервування	Математичний апарат
Загальне холодне резервування (загальне заміщення з цілою кратністю) 	У межах основного вузла ***0*** використовуються формули послідовного з'єднання елементів. Для паралельного з'єднання холодних резервів: $T_\Sigma = T_0 + T_1 + \ldots + T_m = T_{сер} \cdot (m+1)$; $P_\Sigma = P_{серJ} \sum_{j=0}^{m} \frac{(-\ln P_{серJ})^j}{j!}$. При $m = 1$ – однократний резерв: $T_\Sigma = 2T_{сер}$; $P_\Sigma = P_{сер} \cdot (1 - \ln P_{сер})$
Роздільне холодне резервування (роздільне заміщення) 	Для *i*-го вертикального фрагмента схеми ймовірність безвідмовної роботи $P_{i\Sigma}$ визначається формулами холодного резервування (наведені вище). Для системи $P_\Sigma = \prod_{i=1}^{n} P_{i\Sigma}$. Еквівалентна схема: 
Загальне гаряче резервування  Еквівалентна схема: 	У межах основного вузла ***0*** використовуються формули послідовного з'єднання елементів. Для паралельного з'єднання гарячих резервів: $Q_\Sigma = \prod_{j=0}^{m} Q_j = \prod_{j=0}^{m} (1 - P_j)$; $P_\Sigma = 1 - Q_\Sigma = 1 - \prod_{j=0}^{m} (1 - P_j)$; $\lambda_\Sigma \neq const \Rightarrow P$ – не експонента. Спрощення: якщо $\lambda_0 = \lambda_1 = \ldots = \lambda_m$, то $T_{серΣ} = \frac{1}{\lambda_{серJ}} \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{j+1} = T_{серJ} \sum_{j=0}^{m} \frac{1}{j+1}$

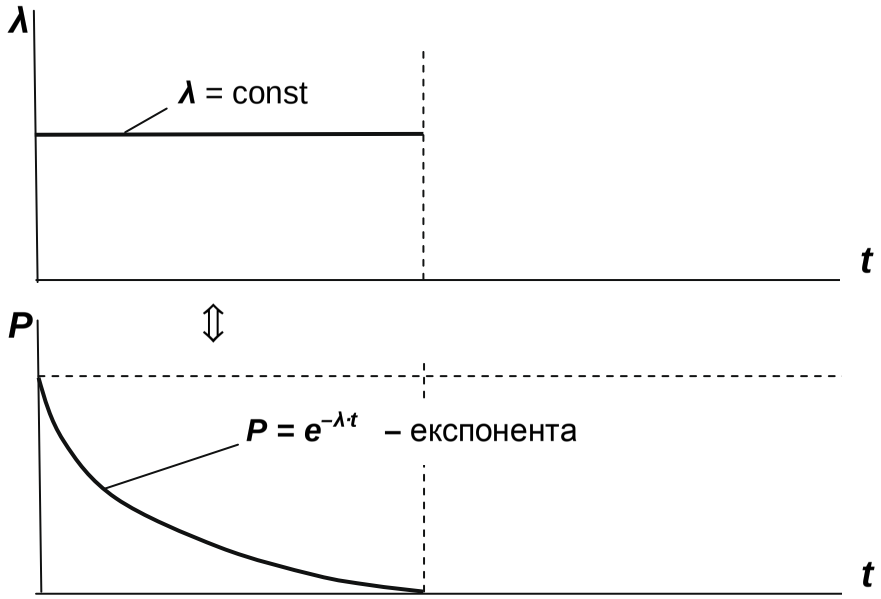
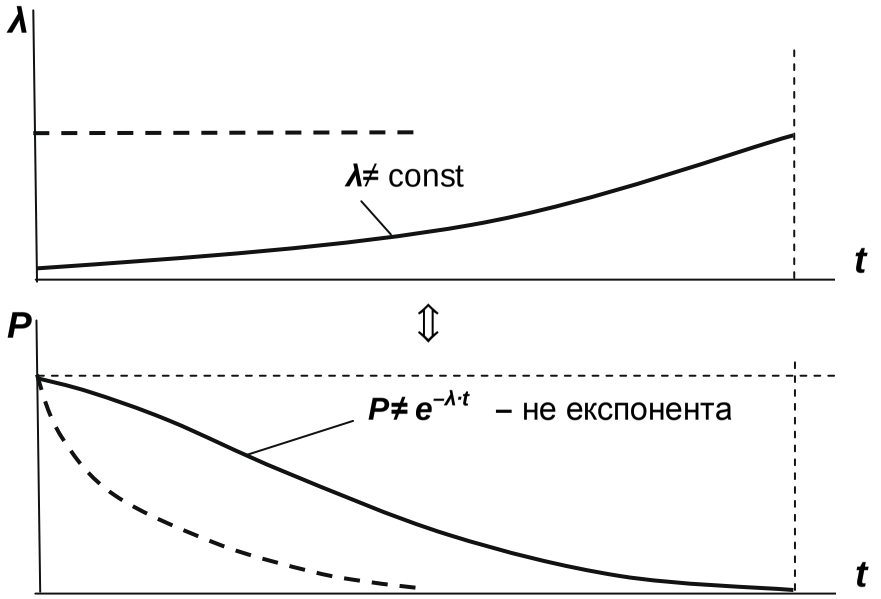
Закінчення табл. 5.3

Схема резервування	Математичний апарат
Роздільне гаряче резервування  	Для ***i***-го вертикального фрагмента схеми ймовірність безвідмовної роботи $P_{i\Sigma}$ визначається формулами гарячого резервування: $$P_{i\Sigma} = 1 - \prod_{j=0}^{m}(1-P_j) = 1-(1-P_i)^{m+1}\ .$$ Для системи $P_\Sigma = \prod_{i=1}^{n} P_{i\Sigma}$. Еквівалентна схема: 
Загальне гаряче резервування з дробовою кратністю  Основні елементи системи, необхідні для нормальної експлуатації, наприклад чотири колеса автомобіля Резервні елементи системи, наприклад іще 14 коліс автопоїзда	Для паралельного з'єднання гарячих резервів з дробовою кратністю: $$T_{cep\Sigma} = \frac{1}{\lambda_{cep}} \sum_{i=0}^{k-h} \frac{1}{h+i}\ ;$$ $$P_\Sigma = \sum_{i=0}^{k-h} C_k^i P^{k-i} \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^j P^j\ ,$$ де λ_{cep} – середня інтенсивність відмов елементів системи; $k = m+1$ – загальна кількість основних і резервних елементів; h – кількість елементів, необхідних для нормальної роботи системи (наприклад: $h = 4$, $k = 18$); P – імовірність безвідмовної роботи будь-якого основного або резервного елемента – середня; $C_i^j = \frac{i!}{j!\,(i-j)!}$ – кількість з'єднань з i елементів по j (комбінаторика)
Мажоритарне резервування  	$$P_\Sigma = P_1 \cdot P_м$$

Таблиця 5.4

Особливості розрахунку безвідмовності резервованих систем

Розрахунки безвідмовності резервованих об'єктів є складнішими, ніж розглянуті раніше. Складність полягає в неможливості використання спрощеної експоненціальної моделі для розрахунків резервованих об'єктів

Показники безвідмовності експоненціальної моделі	**Показники безвідмовності резервованих об'єктів**
	
Завдяки спрощенням (інтенсивність відмов – константа, імовірність безвідмовної роботи – експонента) мають місце прості розрахункові співвідношення: $\lambda = const,\ P = e^{-\lambda \cdot t},\ T_{сер} = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{T_{сер}},\ \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$. Існує можливість визначити будь-який показник безвідмовності об'єкта в будь-який момент часу, але лише для нерезервованих й неремонтованих об'єктів	Порушено всі співвідношення для експоненціальної моделі, що добре видно на наведених вище графіках: $\lambda \neq const,\ P \neq e^{-\lambda \cdot t},\ T_{сер} \neq \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda \neq \frac{1}{T_{сер}},\ \lambda_{\Sigma} \neq \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$. Точніше оцінювання надійності резервованих об'єктів полягає в послідовному розрахунку ймовірності P у кожний момент часу t окремо

Розділ 6. МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ПРОГРАМ

Метрологічна надійність − здатність засобів вимірювання зберігати встановлені значення метрологічних характеристик протягом заданого часу при певних режимах та умовах експлуатації.

У процесі експлуатації засобів вимірювання відбуваються відмови, коли ці засоби вимірювання не можуть виконувати своїх функцій.

Відмови підрозділяються на неметрологічні й метрологічні. Неметрологічними називають відмови, зумовлені причинами, не пов'язаними зі зміною метрологічної характеристики засобу вимірювання. Ці відмови мають головним чином явний характер, відбуваються раптово. Їх можна виявити без вивірення. Метрологічними називають відмови, спричинені виходом метрологічної характеристики за визначені допустимі межі. Метрологічні відмови часто мають неявний характер.

Метрологічні відмови поділяють на раптові й поступові.

Раптовими називають відмови, що характеризуються стрибкоподібним зміненням метрологічних характеристик. Їх наслідки (збій показників приладу, втрата чутливості й т.ін.) легко виявляються під час експлуатації приладу, тобто за характером вони є явними. Особливістю раптових відмов є постійність у часі їх інтенсивності. Це дає можливість застосовувати для їх аналізу класичну теорію надійності з експоненціальною моделлю.

Поступовими називають відмови, що характеризуються монотонним зміненням однієї або декількох метрологічних характеристик. Ці відмови часто є наслідком старіння й спрацювання елементів і вузлів засобів вимірювання, тому їх інтенсивність з часом збільшується. Поступові відмови є прихованими, і їх можна виявити лише під час чергового вивірення засобу вимірювання, тому міжвивірні інтервали визначають з урахуванням метрологічної надійності засобів вимірювання.

Для розрахунку міжвивірних інтервалів засобів вимірювання обробляють статистичні дані за основними показниками надійності в конкретних умовах експлуатації шляхом оброблення й інтерполяції даних, накопичених у період експлуатації, і вивірення засобів вимірювання. Вивірні інтервали визначають за формулою

$$T_1 = T_м \cdot \ln P_{доп}\,, \qquad \text{або} \quad T_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln P_{доп}\,,$$

де T_1 – перший міжвивірний інтервал;

$T_м$ – наробок на метрологічну відмову засобу вимірювання;

λ – інтенсивність метрологічних відмов засобу вимірювання;

$P_{доп}$ – допустима ймовірність безвідмовної роботи.

Величину $P_{доп}$ для робочих засобів вимірювання вибирають у межах 0,85…0,99 залежно від відповідальності вимірів. Для відповідальних вимірів, наприклад вимірів вихідних параметрів основних виробів, $P_{доп}$ рекомендується брати в межах 0,95…0,99.

Визначення міжвивірних інтервалів для засобів вимірювання − функція організацій, що проводять вивірення цих засобів. Міжвивірні інтервали рекомендується виражати або в годинах наробку, або в календарному часі (у місяцях), використовуючи ряд чисел: 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 9; 12; 18; 24 і 36.

Визначаючи міжвивірні інтервали засобів вимірювання, виконують такі операції:

− формують однорідні групи засобів вимірювання;

− визначають перший міжвивірний інтервал для кожної групи засобів вимірювання;

− збирають та обробляють статистичну інформацію про поведінку засобів вимірювання кожної однорідної групи в конкретних умовах експлуатації протягом визначеного міжвивірного інтервалу й групують статистичні дані за показниками надійності;

− оцінюють правильність раніше визначеного міжвивірного інтервалу і, якщо потрібно, його коректують (збільшують або зменшують);

− збирають та обробляють статистичну інформацію про поведінку кожної однорідної групи в конкретних умовах і оцінюють правильність раніше визначеного міжвивірного інтервалу після кожного чергового вивірення всіх засобів вимірювання однорідної групи протягом усього періоду їх експлуатації.

Однорідні групи формують із не менш ніж 30 засобів вимірювання, спираючись на спільність таких факторів: показники надійності (тип, призначення, завод-виробник, рік випуску, клас точності, наявність вібрації й т.ін.); інтенсивність експлуатації; допустима ймовірність безвідмовної роботи.

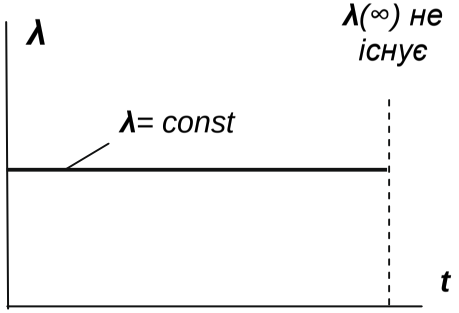
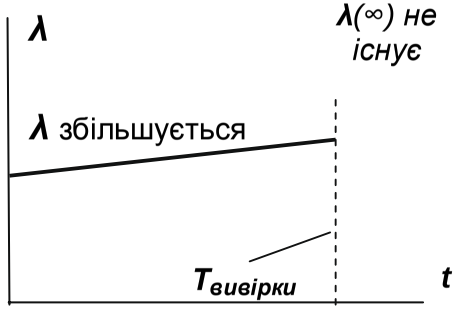
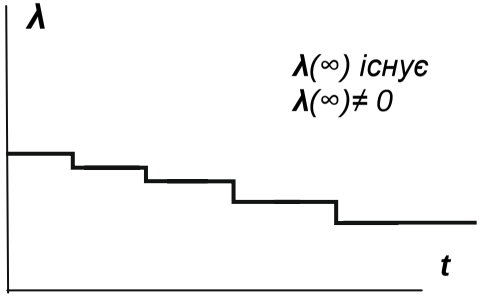
Перший міжвивірний інтервал (як і скоректовані), якщо значення показників надійності є відомими, розраховують − один для всіх засобів вимірювання, що входять до складу однорідної групи. Якщо значення показників надійності є невідомими, то перший міжвивірний інтервал беруть таким, що дорівнює періодичності вивірень на підприємстві.

У разі відмови засоби вимірювання підлягають ремонту й подальшому вивіренню незалежно від установленого міжвивірного інтервалу.

У табл. 6.1 наведено основні відмінності між розділами теорії надійності – класичною надійністю, надійністю програмного забезпечення (ПЗ) і метрологічною надійністю засобів вимірювання.

Таблиця 6.1

Розділи теорії надійності

Характеристики	**Класична надійність**	**Метрологічна надійність**	**Надійність програм**
Характер відмов	Відмови виробів: раптові; явні, неявні	Метрологічні відмови: поступові; неявні	Відмови програм: раптові; явні, неявні
Виявлення відмов	Під час експлуатації, проведення регламентних і контрольних перевірок	Під час метрологічного вивірення	Під час експлуатації, тестування
Змінення в часі інтенсивності відмов ***λ***	 Не змінюється протягом періоду існування виробу	 Збільшується внаслідок старіння протягом періоду між вивірками	 Зменшується внаслідок дороблення програм, але ніколи не дорівнює нулю
Довговічність і здатність до зберігання	Класичні	Класичні	Програмне забезпечення вважають нескінченно довговічним і таким, що нескінченно зберігається
Ремонто-придатність	Ремонтопридатність є однаковою у всіх випадках		

Розділ 7. НАДІЙНІСТЬ ВІДНОВНИХ (РЕМОНТОВНИХ) ОБ'ЄКТІВ

Терміни надійності, використані в цьому підручнику, визначено в системі стандартів «Надійність у техніці».

Ремонт – комплекс операцій із відновлення справності або роботоздатності виробів, відновлення ресурсів виробів або їх складових частин.

У цій системі стандартів терміни «відновний об'єкт» і «ремонтовний об'єкт» різняться.

Відновний об'єкт – об'єкт, для якого відновлення роботоздатного стану передбачено в нормативно-технічній і (або) конструкторській документації.

Ремонтовний об'єкт – об'єкт, для якого проведення ремонтів передбачено в нормативно-технічній і (або) конструкторській документації.

Очевидно, що відмінності, зважаючи на вивчення тільки основ теорії надійності, є незначними, і в межах цього підручника ними знехтуємо.

При відмові відновного (ремонтовного) об'єкта виконувана операція зазвичай може продовжитися після усунення відмови. Приклади таких об'єктів – верстати, автомобілі, літаки, телевізори, комп'ютери, гаджети.

Досить часто критеріями надійності відновних об'єктів можуть бути розглянуті раніше критерії надійності для невідновних об'єктів, наприклад: імовірність безвідмовної роботи, частота відмов, інтенсивність відмов, наробок на першу відмову. Цими критеріями необхідно користуватися для оцінювання надійності відновного об'єкта до першої відмови. Також критеріями надійності відновних об'єктів можуть бути комплексні критерії надійності, які є зручними саме для ремонтовних систем. Прикладом такого комплексного критерію є коефіцієнт готовності.

Особливо актуальним у сучасних технічних об'єктах є випадок резервованої системи, коли її відмова є неприпустимою. Тоді застосовується резервування елементів системи з відновленням резервних елементів, що відмовили, у процесі роботи системи.

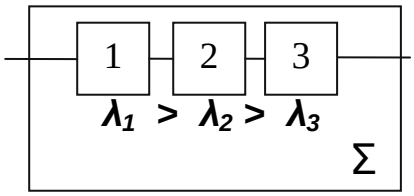
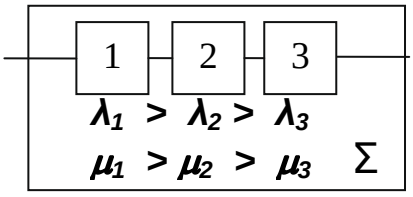
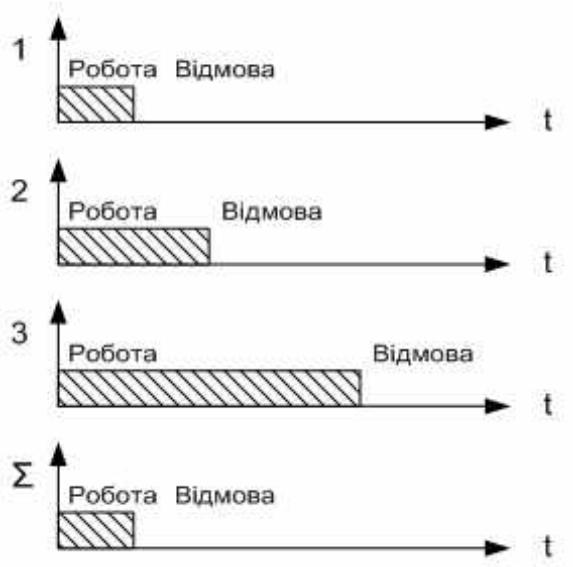
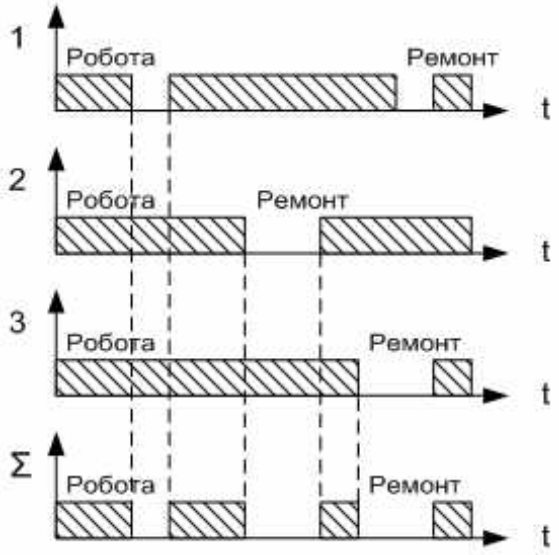
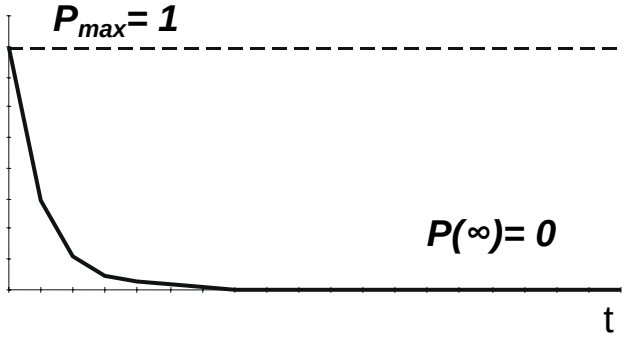
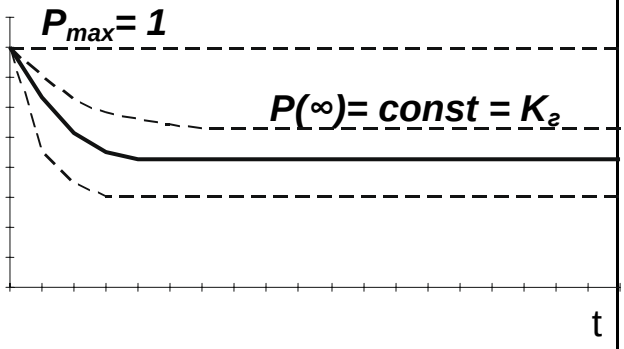
У табл. 7.1 наведено найбільш поширені показники надійності для відновних об'єктів, зокрема ймовірність і середній час відновлення роботоздатного стану, коефіцієнт готовності, та формули для їх визначення. Для порівняння наведено аналогічні показники для невідновних об'єктів.

Таблиця 7.1

Надійність відновних (ремонтовних) об'єктів

Показники для невідновних об'єктів	**Показники для відновних об'єктів**
Показники безвідмовності: імовірність безвідмовної роботи ***P(t)***; імовірність відмови ***Q(t)***; частота відмов ***a(t)*** – щільність розподілу відмов у часі; інтенсивність відмов ***λ(t)*** – також щільність розподілу відмов; середній час наробку на відмову $T_{сер}$, першу і єдину	Показники ремонтопридатності: імовірність відновлення роботоздатності ***V(t)***; імовірність невідновлення роботоздатності; частота ремонтів ***f(t)*** – щільність розподілу часу відновлення; інтенсивність відновлень роботоздатності ***μ(t)*** – також щільність розподілу часу відновлення; середній час відновлення роботоздатності $T_{відн}$; коефіцієнт готовності $K_г$
Визначення показників для експоненціальної моделі безвідмовності: $P(t)= P(t < T_{сер})= e^{-\lambda \cdot t}$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом інтервалу часу ***t***; $Q(t)= P(t \geq T_{сер})= 1- e^{-\lambda \cdot t}$ – імовірність відмови; $T_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N}$ – середній період наробку на відмову; взаємозалежності: $T_{сер} = \int_0^{+\infty} ta(t)dt$, $T_{сер} = \frac{1}{\lambda}$	Визначення показників для експоненціальної моделі відновлення: $V(t)= P(t \geq T_{відн})= 1- e^{-\mu \cdot t}$ – імовірність відновлення роботоздатності об'єкта, тобто імовірність події, коли час $T_{відн}$, необхідний для відновлення об'єкта, є меншим від поточного часу ***t***; $T_{відн} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_{відн\ i}}{N}$ – середній період відновлення роботоздатності; взаємозалежності: $T_{відн} = \int_0^{+\infty} tf(t)dt$, $T_{відн} = \frac{1}{\mu}$

Закінчення табл. 7.1

Приклади характеристик для невідновних об'єктів	**Приклади характеристик для відновних об'єктів**
 Приклад структурної схеми: λ = const – інтенсивність відмов	 Приклад структурної схеми: λ = const – інтенсивність відмов; μ = const – інтенсивність відновлень
Графік роботоздатності 	Графік роботоздатності 
Графічна характеристика безвідмовності – імовірність безвідмовної роботи об'єкта 	Комплексна характеристика надійності для відновних об'єктів – імовірність готовності об'єкта  $K_г$ – коефіцієнт готовності, $K_г = \frac{T_{серΣ}}{T_{серΣ}+T_{відмΣ}}$

Розділ 8. ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

Задача № 1

На випробування поставлено N_0 виробів. За період t відмовило $n(t)$ виробів. За подальший інтервал часу Δt відмовило Δn виробів.

Обчислити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і ймовірність відмови виробу $Q(t)$ за періоди t і $t+\Delta t$, частоту відмов $a(t+\Delta t/2)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t+\Delta t/2)$ на інтервалі Δt, користуючись табл. 8.1.

Побудувати графіки для кількості справних виробів $N(t)$ і кількості виробів, що відмовили, $n(t)$.

Таблиця 8.1

Вихідні дані й відповіді для задачі № 1

Номер варіанта	Вихідні дані					Відповіді			
	N_0	t, год	Δt, год	$n(t)$	Δn	$P(t)$	$P(t+\Delta t)$	$a(t+\Delta t/2)$, відм./год	$\lambda(t+\Delta t/2)$, відм./год
1	400	3000	100	200	100	0,5	0,25	$2{,}5\cdot10^{-3}$	$6{,}7\cdot10^{-3}$
2	1000	3000	1000	80	50	0,92	0,87	$5\cdot10^{-5}$	$5{,}6\cdot10^{-5}$
3	100	8000	100	50	10	0,5	0,4	$1\cdot10^{-3}$	$2{,}22\cdot10^{-3}$
4	10	1000	100	3	2	0,7	0,5	$2\cdot10^{-3}$	$3{,}33\cdot10^{-3}$
5	10	1000	100	3	1	0,7	0,6	$1\cdot10^{-3}$	$1{,}54\cdot10^{-3}$
6	1000	0	1000	0	20	1,0	0,98	$0{,}2\cdot10^{-5}$	$0{,}202\cdot10^{-5}$
7	1000	1000	1000	20	25	0,98	0,955	$0{,}25\cdot10^{-4}$	$0{,}258\cdot10^{-4}$
8	1000	2000	1000	45	35	0,955	0,92	$0{,}35\cdot10^{-4}$	$0{,}373\cdot10^{-4}$
9	1000	0	100	0	50	1,0	0,95	$0{,}5\cdot10^{-3}$	$0{,}514\cdot10^{-3}$
10	45	75	5	44	1	0,022	0	$4{,}44\cdot10^{-3}$	$400\cdot10^{-3}$
11	45	0	10	0	19	1,0	0,578	$4{,}22\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$
12	1000	5000	1000	160	50	0,84	0,79	$5\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-4}$
13	1000	4000	1000	130	30	0,87	0,84	$3\cdot10^{-5}$	$3{,}5\cdot10^{-5}$
14	1000	100	100	50	40	0,95	0,91	$0{,}4\cdot10^{-3}$	$0{,}43\cdot10^{-3}$
15	1000	200	100	90	32	0,91	0,878	$3{,}2\cdot10^{-4}$	$3{,}6\cdot10^{-4}$
16	45	10	10	19	13	0,578	0,289	$2{,}89\cdot10^{-2}$	$6{,}67\cdot10^{-2}$
17	45	60	10	44	1	0,022	0	$0{,}22\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-1}$
18	45	55	5	1	5	0,978	0,867	$22\cdot10^{-3}$	$24\cdot10^{-3}$
19	1000	300	100	122	25	0,878	0,853	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$2{,}9\cdot10^{-4}$
20	1000	2900	100	535	40	0,465	0,425	$0{,}4\cdot10^{-3}$	$0{,}9\cdot10^{-3}$

Задача № 2

Виріб складається з N елементів, середня інтенсивність відмов яких становить λ_i.

Обчислити ймовірність безвідмовної роботи виробу $P(t)$ протягом часу t і середній наробок на першу відмову $T_{сер}$, користуючись табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Вихідні дані й відповіді для задачі № 2

Номер варіанта	Вихідні дані			Відповіді	
	N	λ_i, відм./год	t, год	$P(t)$	$T_{сер}$, год
1	5200	$0{,}16\cdot10^{-5}$	200	0,19	120
2	3600	$0{,}2\cdot10^{-5}$	50	0,698	139
3	2500	$0{,}35\cdot10^{-6}$	100	0,916	1143
4	2500	$0{,}5\cdot10^{-5}$	100	0,2865	80
5	1000	$0{,}5\cdot10^{-5}$	100	0,6065	200
6	750	$0{,}5\cdot10^{-5}$	100	0,6873	266
7	500	$0{,}5\cdot10^{-5}$	100	0,7788	400
8	250	$0{,}5\cdot10^{-5}$	100	0,8825	800
9	20500	$2\cdot10^{-5}$	2	0,44	2,44
10	1000	$0{,}5\cdot10^{-3}$	0,5	0,7788	2
11	2000	$5\cdot10^{-6}$	10	0,905	100
12	95000	$0{,}5\cdot10^{-6}$	2	0,91	21
13	15000	$0{,}25\cdot10^{-6}$	4	0,99	267
14	45000	$0{,}5\cdot10^{-5}$	2	0,6376	4,4
15	300000	$0{,}2\cdot10^{-7}$	8	0,953	166,7
16	50000	$0{,}2\cdot10^{-6}$	5	0,95	100
17	170000	$0{,}7\cdot10^{-6}$	3	0,7	8,4
18	189000	$1{,}4\cdot10^{-6}$	2	0,59	3,8
19	547000	$0{,}4\cdot10^{-6}$	2	0,64	4,57
20	35	$1\cdot10^{-5}$	1000	0,7	2860

Задача № 3

У виробі можуть бути використані лише ті елементи, середня інтенсивність відмов яких становить λ_i. Виріб складається з N елементів.

Користуючись табл. 8.3, визначити середній наробок виробу на першу відмову $T_{сер}$ і ймовірність безвідмовної роботи виробу:

– наприкінці першої години експлуатації $P_{\Sigma}(1)$;

– наприкінці десятої години експлуатації $P_{\Sigma}(10)$;

– наприкінці сотої години експлуатації $P_{\Sigma}(100)$.

Таблиця 8.3

Вихідні дані й відповіді для задачі № 3

Номер варіанта	Вихідні дані		Відповіді	
	λ_i, відм./год	N	$P_{\Sigma}(1)$	$T_{сер}$, год
1	$1\cdot10^{-5}$	500	0,995	200
2	$1\cdot10^{-5}$	2500	0,975	40
3	$1\cdot10^{-3}$	100	0,905	10
4	$1\cdot10^{-4}$	100	0,99	100
5	$1\cdot10^{-5}$	100	0,999	1000
6	$1\cdot10^{-4}$	1000	0,905	10
7	$3,5\cdot10^{-5}$	200	0,993	143
8	$2\cdot10^{-6}$	700	0,9986	714
9	$2\cdot10^{-5}$	10000	0,8187	5
10	$2\cdot10^{-6}$	50000	0,905	10
11	$4\cdot10^{-4}$	500	0,8187	5
12	$2\cdot10^{-6}$	2500	0,995	200
13	$2\cdot10^{-7}$	8000	0,9984	625
14	$1\cdot10^{-5}$	50	0,9995	2000
15	$4\cdot10^{-6}$	60	0,99976	4166
16	$2,5\cdot10^{-3}$	20	0,95	20
17	$2,5\cdot10^{-5}$	100	0,9975	400
18	$2,5\cdot10^{-5}$	400	0,999	100
19	$2,5\cdot10^{-5}$	1000	0,975	40
20	$2,5\cdot10^{-5}$	40	0,999	1000

Задача № 4

Виконати орієнтовний розрахунок надійності системи, що складається з N елементів різних типів. Обчислити ймовірність безвідмовної роботи системи $P(t)$ протягом заданого періоду t і середній наробок виробу на першу відмову $T_{сер}$, користуючись табл. 8.4.

Дані про інтенсивність відмов елементів наведено в дод. 1.

Таблиця 8.4

Вихідні дані й відповіді для задачі № 4

Номер варіанта	Вихідні дані													Період роботи *t, год*
	Резистори ***R***		Конденсатори ***C***		Діоди ***V1***		Транзистори ***V2***		Силові трансформатори	Дроселі	***L*** - котушки індуктивності	Електричні двигуни		
	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	
1	МЛТ-0.25 ПКВ-2	13 12	Керамічні Танталові	8 13	Германієві випрямні	15	Малопотужні германієві	6	1	3	2	-	-	2500
2	МЛТ-0.25 ПКВ-2	5 15	Керамічні Танталові	7 16	Кремнієві випрямні	1	Потужні германієві	1	2	3	5	-	-	5000
3	ВС-0.25 ВС-0.5	2 16	Паперові	18	Кремнієві випрямні	6	Потужні кремнієві	7	4	4	-	-	-	1000
4	ВС-0.25 МЛТ-1	6 10	Керамічні Танталові	6 16	Германієві імпульсні	6	Малопотужні германієві	7	3	3	2	-	-	3200
5	МЛТ-0.5 МЛТ-1	4 18	Слюдяні Танталові	5 13	Кремнієві випрямні	15	Малопотужні кремнієві	9	1	-	4	-	-	260
6	МЛТ-0.25 МЛТ-0.5 МЛТ-1	2 12 16	Керамічні Танталові	8 14	Германієві імпульсні	14	Малопотужні германієві	9	1	1	2	Двигуни 3000 об/хв	1	300
7	ВС-0.25 ВС-0.5 ВС-1	2 14 16	Слюдяні Танталові	1 12	Германієві імпульсні	16	Потужні, малопотужні германієві	5 4	1	1	2	Двигуни 4000 об/хв	1	650
8	МЛТ-0.5 МЛТ-1 МЛТ-2	3 19 14	Керамічні Танталові	8 15	Германієві випрямні	9	Потужні, малопотужні германієві	1 4	2	2	4	-	-	1500
9	МЛТ-0.25 МЛТ-1	4 12	Слюдяні Керамічні Танталові	3 49 16	Кремнієві випрямні	12	Малопотужні кремнієві	1	2	-	40	-	-	5000
10	МЛТ-0.25 МЛТ-1	2 15	Слюдяні	18	Кремнієві випрямні	6	Малопотужні кремнієві	7	5	2	-	-		2000

Закінчення табл. 8.4

Номер варіанта	Вихідні дані													Період роботи *t, год*
	Резистори ***R***		Конденсатори ***C***		Діоди ***V1***		Транзистори ***V2***		Силові трансформатори	Дроселі	***L*** - котушки індуктивності	Електричні двигуни		
	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	*Кіль-кість*	Тип	*Кіль-кість*	
11	МЛТ-0.25 МЛТ-0.5	13 10	Керамічні Танталові	18 3	Германієві випрямні	5	Малопотужні германієві	6	1	3	2	-	-	2500
12	МЛТ-0.25 ПКВ-2	25 5	Керамічні Танталові	27 6	Кремнієві випрямні	10	Потужні германієві	10	2	3	5	-	-	500
13	ВС-0.25 ВС-1	20 3	Паперові	8	Кремнієві випрямні	16	Потужні кремнієві	7	4	4	-	-	-	1000
14	ВС-0.25 МЛТ-1	16 10	Керамічні Танталові	6 6	Германієві імпульсні	16	Малопотужні германієві	7	3	3	2	-	-	320
15	МЛТ-0.5 МЛТ-1	24 8	Слюдяні Танталові	5 13	Кремнієві випрямні	5	Малопотужні кремнієві	9	1	-	4	-	-	260
16	МЛТ-0.25 МЛТ-0.5 МЛТ-1	22 12 6	Керамічні Танталові	8 14	Германієві імпульсні	4	Малопотужні германієві	9	1	1	2	Двигуни 3000 об/хв	1	300
17	ВС-0.25 ВС-0.5 ВС-1	20 14 6	Слюдяні Танталові	10 12	Германієві імпульсні	6	Потужні, малопотужні германієві	5 4	1	1	2	Двигуни 4000 об/хв	1	650
18	МЛТ-0.5 МЛТ-1 МЛТ-2	32 19 4	Керамічні Танталові	8 15	Германієві випрямні	9	Потужні, малопотужні германієві	11 4	2	2	4	-	-	260
19	МЛТ-0.25 МЛТ-1	40 2	Слюдяні Керамічні Танталові	30 49 6	Кремнієві випрямні	2	Малопотужні кремнієві	10	2	-	40	-	-	5000
20	МЛТ-0.25 МЛТ-0.5	21 5	Слюдяні	8	Кремнієві випрямні	16	Малопотужні кремнієві	7	5	2	-	-		2000

Задача № 5

Згідно з принциповою електричною схемою монітор складається з таких елементів:

- великі інтегральні схеми [$\lambda_1 = (0{,}08\ldots0{,}11)\cdot10^{-3}$ *відм./год*] – 20 *шт.*;
- приймальна трубка ($\lambda_2 = 0{,}23\cdot10^{-3}$ *відм./год*) – 1 *шт.*;
- резистори вугільні ($\lambda_3 = 0{,}35\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 80 *шт.*;
- резистори дротяні ($\lambda_4 = 1{,}25\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 4 *шт.*;
- конденсатори керамічні ($\lambda_5 = 0{,}23\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 27 *шт.*;
- конденсатори паперові ($\lambda_6 = 0{,}16\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 25 *шт.*;
- конденсатори змінної ємності ($\lambda_7 = 1{,}86\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 4 *шт.*;
- конденсатори електролітичні ($\lambda_8 = 8{,}0\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 8 *шт.*;
- конденсатори інших типів [$\lambda_9 = (0{,}12\ldots0{,}2)\cdot10^{-5}$ *відм./год*] – 12 *шт.*;
- котушки індуктивності [$\lambda_{10} = (0{,}1\ldots0{,}15)\cdot10^{-5}$ *відм./год*] – 51 *шт.*;
- трансформатори [$\lambda_{11} = (0{,}4\ldots0{,}6)\cdot10^{-5}$ *відм./год*] – 6 *шт.*;
- дроселі [$\lambda_{12} = (0{,}1\ldots0{,}15)\cdot10^{-5}$ *відм./год*] – 6 *шт.*;
- плавкі вставки ($\lambda_{13} = 1\cdot10^{-5}$ *відм./год*) – 3 *шт.*

Виконати орієнтовний розрахунок надійності монітора, а саме: розрахувати ймовірність безвідмовної роботи $P_\Sigma(t)$ і середній наробок монітора на першу відмову $T_{сер\Sigma}$ для мінімального й максимального значень інтенсивності відмов, а також побудувати два графіки залежностей $P_{max\Sigma}(t)$ і $P_{min\Sigma}(t)$ для максимальних і мінімальних значень інтенсивності відмов елементів у діапазоні $1 \geq P \geq 0{,}1$.

Відповідь: $P_\Sigma(t) = e^{(3{,}1\ldots3{,}75)\cdot10^{-3}t}$, $T_{сер\Sigma} \approx 323\ldots267$ *год*.

Задача № 6

Виконати орієнтовний розрахунок надійності системи, що складається з N елементів різних типів. Обчислити ймовірність безвідмовної роботи $P_\Sigma(t)$ протягом часу безперервної роботи виробу t і середній наробок системи на першу відмову $T_{сер\Sigma}$, а також побудувати два графіки залежностей $P_{max\Sigma}(t)$ і $P_{min\Sigma}(t)$ у діапазоні $1 \geq P \geq 0{,}1$, користуючись табл. 8.5.

При побудові графіків заданий час t не враховується.

Дані про інтенсивність відмов елементів наведено в дод. 1.

Таблиця 8.5

Вихідні дані й відповіді для задачі № 6

Номер варіанта	Номенклатура і кількість елементів																	Період безперервної роботи t, *год*
	Резистори	Конденсатори	Діоди	Транзистори	Електронні лампи	Реле	Батареї	Вимикачі	Гіроскопи	Електродвигуни	Генератори	Дроселі	Котушки індуктивності	Перемикачі (контактних груп)	Потенціометри	Перетворювачі	Рознімні з'єднання	Трансформа-тори	
1	82	30	24	12	-	18	-	2	3	-	-	6	-	2	6	1	4	2	100
2	260	143	-	-	59	19	-	12	-	9	-	49	6	10	8	1	20	8	24
3	2520	1286	32	118	-	19	-	12	-	9	-	8	4	10	8	1	20	8	120
4	18	63	32	-	-	64	2	42	-	-	6	4	18	16	-	4	26	-	200
5	868	386	132	86	-	112	2	-	3	4	-	16	24	8	12	3	16	8	10
6	596	73	386	138	10	31	-	-	-	-	-	2	-	22	6	-	-	4	1000
7	30	33	10	10	-	-	-	-	-	-	-	3	5	-	-	-	-	2	5000
8	9000	31000	1000	-	7725	-	-	-	-	-	-	186	1726	260	-	-	8	2500	10
9	65	27	7	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	1	10000
10	29	8	16	7	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	4	1000
11	41	87	2	10	-	-	-	-	-	-	-	40	-	12	-	-	-	2	10000
12	53	54	3	16	-	-	-	-	-	-	-	156	-	4	-	-	-	-	5000
13	82	82	24	24	6	8	8	6	8	6	8	8	6	3	8	3	6	8	100
14	260	260	-	-	49	8	8	49	8	49	8	8	49	-	8	-	49	8	24
15	2520	2520	32	32	8	-	-	8	-	8	-	-	8	-	-	-	8	-	120
16	18	18	32	32	4	8	8	4	8	4	8	8	4	-	8	-	4	8	200
17	868	868	-	132	16	4	4	-	4	16	4	4	16	3	4	3	16	4	10
18	5	596	6	386	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	-	2	2	1000
19	30	30	10	10	3	2500	-	3	2	3	5	50	3	-	-	-	3	2500	5000
20	3000	30000	100	1000	186	1	0	186	1	6	1	1	-	-	1	-	86	1	10

Задача № 7

Виріб складається з N частин. Надійність кожної частини виробу характеризується ймовірністю безвідмовної роботи $p_i(t)$ протягом часу t.

Знайти ймовірність безвідмовної роботи виробу $P_\Sigma(t)$, користуючись табл. 8.6.

Таблиця 8.6

Вихідні дані й відповіді для задачі № 7

Номер варіанта	Вихідні дані										Відповідь
	N	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_4(t)$	$p_5(t)$	$p_6(t)$	$p_7(t)$	$p_8(t)$	$p_9(t)$	$P_\Sigma(t)$
1	3	0,97	0,98	0,99	-	-	-	-	-	-	0,94
2	7	0,95	0,96	0,97	0,97	0,975	0,98	0,98	-	-	0,80
3	6	0,98	0,98	0,982	0,982	0,984	0,984	-	-	-	0,90
4	5	0,9996	0,9998	0,9996	0,999	0,998	-	-	-	-	0,996
5	6	0,998	0,98	0,975	0,96	0,95	0,94	-	-	-	0,82
6	9	0,9999	0,996	0,996	0,994	0,994	0,994	0,992	0,992	0,992	0,956
7	9	0,95	0,95	0,95	0,955	0,955	0,955	0,960	0,960	0,960	0,66
8	9	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	0,9998	0,9996	0,9996	0,9996	0,998
9	9	0,9994	0,9994	0,9994	0,9992	0,9992	0,9992	0,999	0,999	0,999	0,993
10	9	0,998	0,998	0,998	0,996	0,996	0,996	0,994	0,994	0,994	0,96
11	8	0,992	0,992	0,992	0,99	0,99	0,99	0,988	0,988	-	0,923
12	8	0,986	0,986	0,986	0,984	0,984	0,982	0,982	0,982	-	0,875
13	8	0,98	0,98	0,975	0,975	0,97	0,97	0,965	0,965	-	0,799
14	7	0,97	0,97	0,97	0,965	0,965	0,96	0,96	-	-	0,783
15	7	0,995	0,995	0,955	0,955	0,95	0,95	0,95	-	-	0,772
16	6	0,945	0,945	0,95	0,955	0,96	0,96	-	-	-	0,747
17	7	0,922	0,922	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	-	-	0,617
18	5	0,922	0,93	0,94	0,945	0,95	-	-	-	-	0,72
19	6	0,95	0,96	0,97	0,97	0,975	0,98	-	-	-	0,82
20	7	0,98	0,98	0,982	0,982	0,984	0,984	0,98	-	-	0,88

Задача № 8

Проводилося спостереження за роботою відновлюваних виробів. Кожний із зразків пропрацював t_i годин і мав n_i відмов.

Визначити наробок на відмову $T_{сер}$ за даними спостереження за роботою всіх виробів, користуючись табл. 8.7.

Таблиця 8.7

Вихідні дані й відповіді для задачі № 8

Номер варіанта	Вихідні дані												Відповідь
	n_1	t_1, год	n_2	t_2, год	n_3	t_3, год	n_4	t_4, год	n_5	t_5, год	n_6	t_6, год	$T_{сер}$, год
1	3	1650	2	1200	4	2300	-	-	-	-	-	-	572
2	10	1020	18	2700	26	3120	32	4000	24	3480	16	2080	130
3	3	90	6	270	4	140	5	230	-	-	-	-	41
4	12	960	15	1112	8	808	-	-	-	-	-	-	82
5	8	176	5	150	4	112	-	-	-	-	-	-	26
6	6	144	5	125	-	-	-	-	-	-	-	-	24
7	10	1020	18	2700	26	3120	32	4000	24	3480	-	-	130
8	32	4000	24	3480	-	-	-	-	-	-	-	-	134
9	10	1020	26	3120	24	3480	-	-	-	-	-	-	127
10	18	2700	32	4000	24	3480	-	-	-	-	-	-	137
11	1	300	3	600	2	400	-	-	-	-	-	-	216
12	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180	-	-	43
13	12	960	15	1112	8	808	7	1490	-	-	-	-	104
14	8	176	5	150	4	112	8	216	-	-	-	-	26
15	6	144	5	125	3	80	-	-	-	-	-	-	25
16	32	4000	24	3480	16	2080	-	-	-	-	-	-	133
17	10	1020	26	3120	24	3480	18	2700	-	-	-	-	132
18	18	2700	32	4000	24	3480	16	2080	-	-	-	-	136
19	3	720	4	1040	2	500	6	1800	-	-	-	-	271
20	3	720	4	1040	2	500	-	-	-	-	-	-	251

Задача № 9

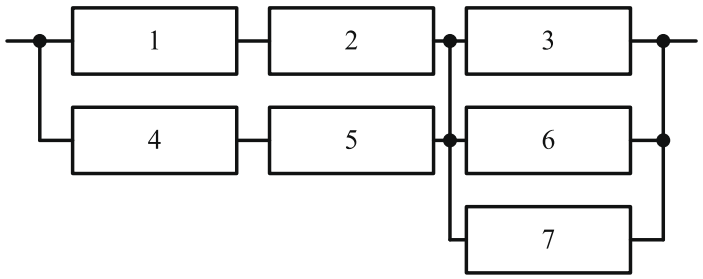
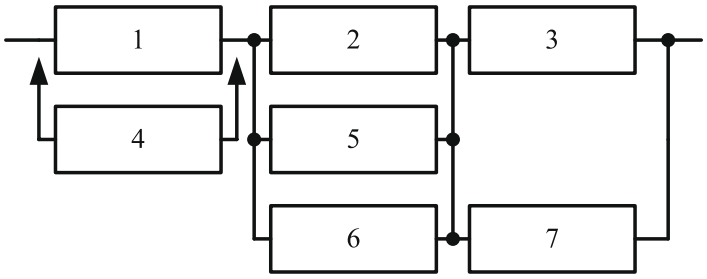
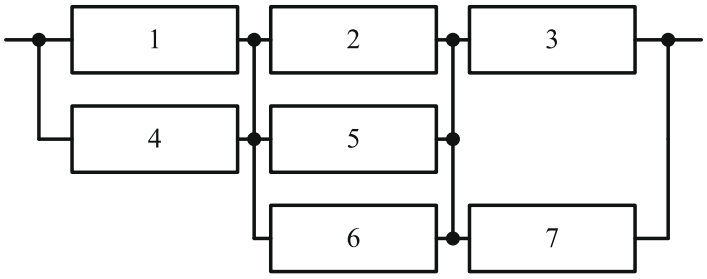
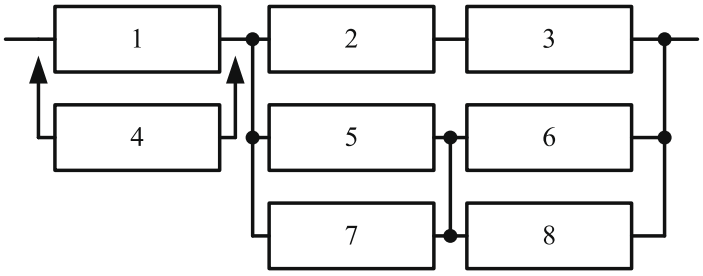
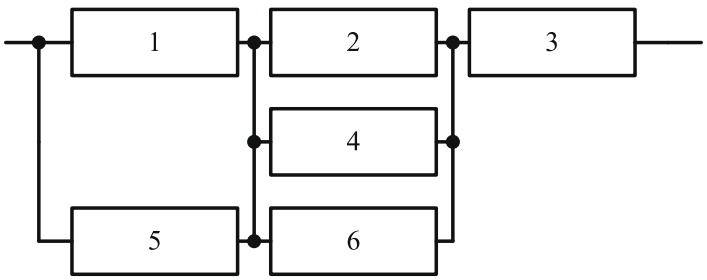
Знайти ймовірність безвідмовної роботи $P_{\Sigma}(100)$ через 100 годин наробку для резервованих пристроїв зі структурними схемами надійності, наведеними в табл. 8.8. Відмови різних пристроїв – події незалежні. Закони надійності всіх елементів є експоненціальними.

Задача № 10

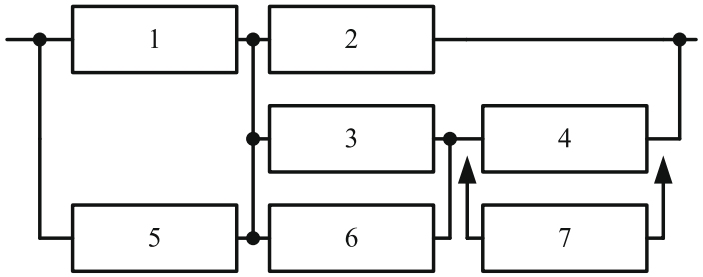
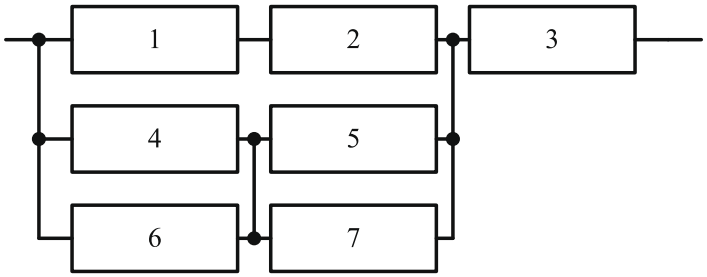
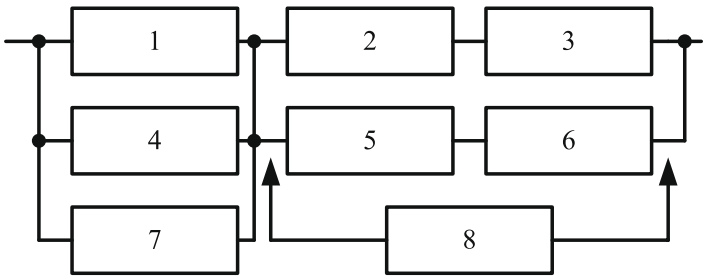
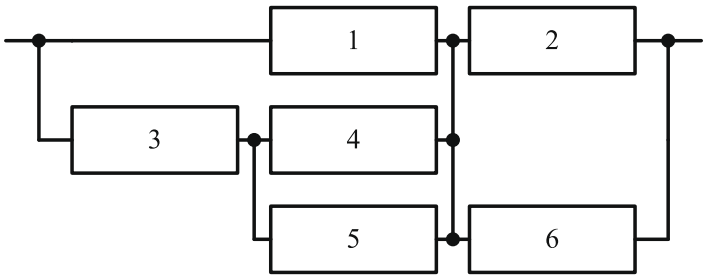
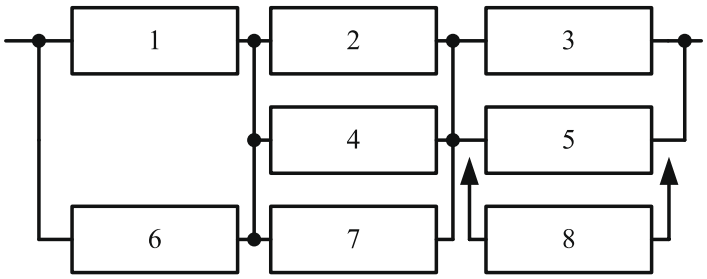
Дані, наведені в задачі № 9, визначено через 100 годин наробку: $P_i = P_i(100)$, $P_{\Sigma} = P_{\Sigma}(100)$. Як зміниться показник безвідмовності через 1000 і 10000 год наробку? Визначити $P_{\Sigma}(1000)$ і $P_{\Sigma}(10000)$. За знайденими значеннями побудувати графік залежності $P_{\Sigma}(t)$. Відмови різних пристроїв – події незалежні. Закони надійності всіх елементів є експоненціальними.

Таблиця 8.8

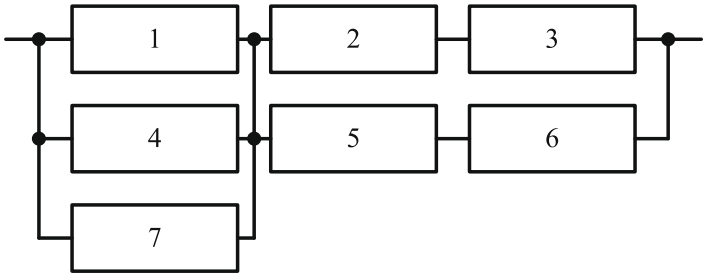
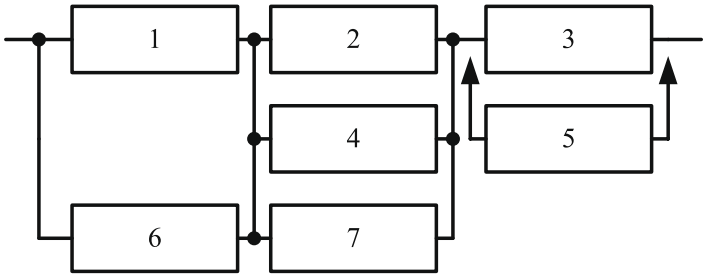
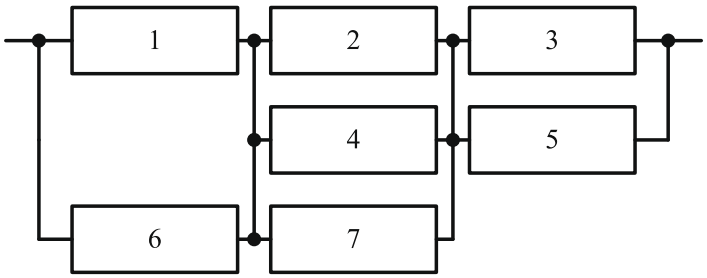
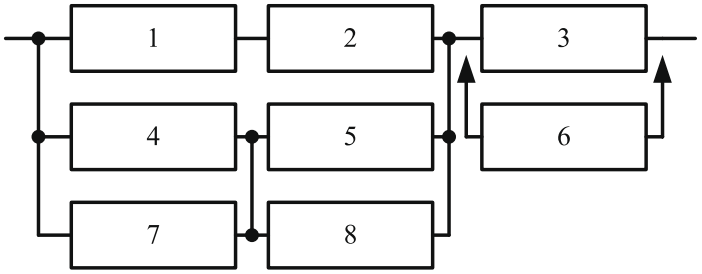
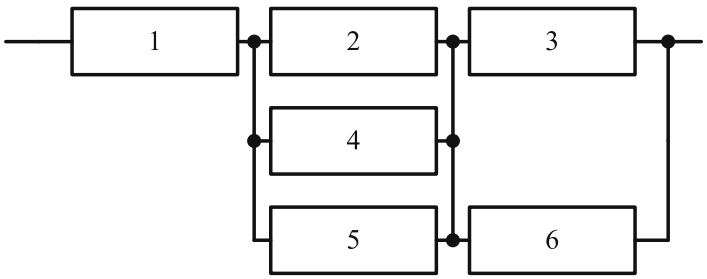
Вихідні дані й відповіді для задач № 9, 10

Номер варіанта	Структурна схема надійності системи	Імовірність безвідмовної роботи елементів	Відповідь
1		$P_1 = 0{,}90$ $P_2 = 0{,}80$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}70$ $P_5 = 0{,}70$ $P_6 = 0{,}80$ $P_7 = 0{,}60$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}84$
2		$P_1 = 0{,}50$ $P_2 = 0{,}75$ $P_3 = 0{,}60$ $P_4 = 0{,}80$ $P_5 = 0{,}65$ $P_6 = 0{,}90$ $P_7 = 0{,}80$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}83$
3		$P_1 = 0{,}60$ $P_2 = 0{,}65$ $P_3 = 0{,}70$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}80$ $P_6 = 0{,}85$ $P_7 = 0{,}90$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}86$
4		$P_1 = 0{,}80$ $P_2 = 0{,}85$ $P_3 = 0{,}90$ $P_4 = 0{,}95$ $P_5 = 0{,}75$ $P_6 = 0{,}80$ $P_7 = 0{,}70$ $P_8 = 0{,}65$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}96$
5		$P_1 = 0{,}50$ $P_2 = 0{,}75$ $P_3 = 0{,}60$ $P_4 = 0{,}80$ $P_5 = 0{,}90$ $P_6 = 0{,}80$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}56$

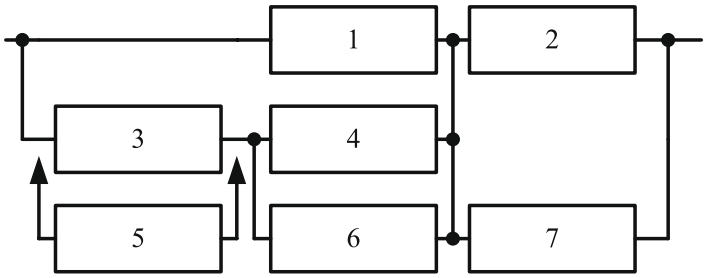
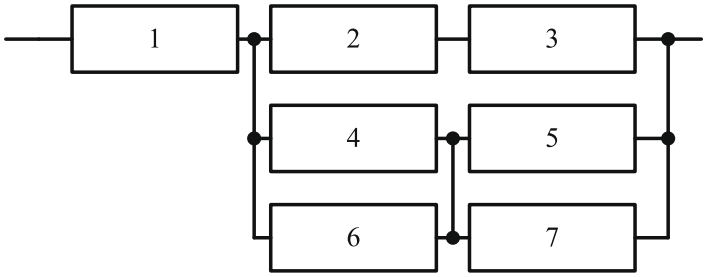
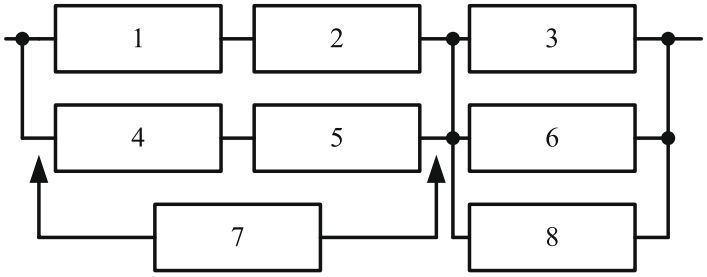
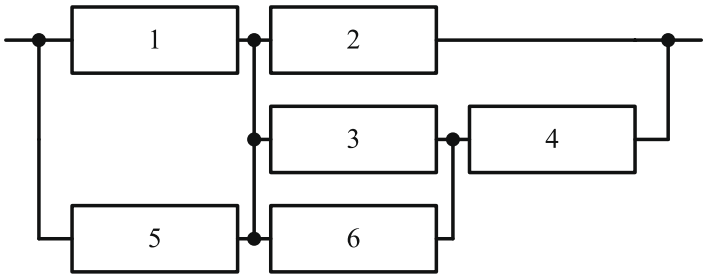
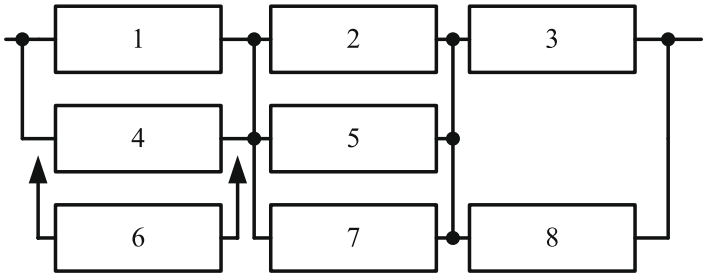
Продовження табл. 8.8

Номер варіанта	Структурна схема надійності системи	Імовірність безвідмовної роботи елементів	Відповідь
6		$P_1 = 0{,}85$ $P_2 = 0{,}90$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}85$ $P_6 = 0{,}70$ $P_7 = 0{,}75$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}96$
7		$P_1 = 0{,}80$ $P_2 = 0{,}85$ $P_3 = 0{,}90$ $P_4 = 0{,}95$ $P_5 = 0{,}75$ $P_6 = 0{,}70$ $P_7 = 0{,}65$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}87$
8		$P_1 = 0{,}90$ $P_2 = 0{,}80$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}70$ $P_5 = 0{,}70$ $P_6 = 0{,}80$ $P_7 = 0{,}80$ $P_8 = 0{,}60$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}95$
9		$P_1 = 0{,}85$ $P_2 = 0{,}90$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}70$ $P_6 = 0{,}60$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}92$
10		$P_1 = 0{,}60$ $P_2 = 0{,}65$ $P_3 = 0{,}70$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}80$ $P_6 = 0{,}75$ $P_7 = 0{,}85$ $P_8 = 0{,}90$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}85$

Продовження табл. 8.8

Номер варіанта	Структурна схема надійності системи	Імовірність безвідмовної роботи елементів	Відповідь
11		$P_1 = 0,90$ $P_2 = 0,85$ $P_3 = 0,80$ $P_4 = 0,75$ $P_5 = 0,95$ $P_6 = 0,65$ $P_7 = 0,70$	$P_\Sigma =$ $= 0,87$
12		$P_1 = 0,50$ $P_2 = 0,75$ $P_3 = 0,60$ $P_4 = 0,80$ $P_5 = 0,65$ $P_6 = 0,90$ $P_7 = 0,80$	$P_\Sigma =$ $= 0,85$
13		$P_1 = 0,80$ $P_2 = 0,80$ $P_3 = 0,90$ $P_4 = 0,80$ $P_5 = 0,70$ $P_6 = 0,70$ $P_7 = 0,60$	$P_\Sigma =$ $= 0,90$
14		$P_1 = 0,80$ $P_2 = 0,85$ $P_3 = 0,90$ $P_4 = 0,95$ $P_5 = 0,75$ $P_6 = 0,80$ $P_7 = 0,70$ $P_8 = 0,65$	$P_\Sigma =$ $= 0,95$
15		$P_1 = 0,90$ $P_2 = 0,85$ $P_3 = 0,75$ $P_4 = 0,80$ $P_5 = 0,60$ $P_6 = 0,70$	$P_\Sigma =$ $= 0,82$

Закінчення табл. 8.8

Номер варіанта	Структурна схема надійності системи	Імовірність безвідмовної роботи елементів	Відповідь
16		$P_1 = 0{,}85$ $P_2 = 0{,}90$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}85$ $P_6 = 0{,}70$ $P_7 = 0{,}60$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}95$
17		$P_1 = 0{,}70$ $P_2 = 0{,}65$ $P_3 = 0{,}60$ $P_4 = 0{,}80$ $P_5 = 0{,}75$ $P_6 = 0{,}90$ $P_7 = 0{,}85$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}67$
18		$P_1 = 0{,}90$ $P_2 = 0{,}80$ $P_3 = 0{,}80$ $P_4 = 0{,}70$ $P_5 = 0{,}70$ $P_6 = 0{,}80$ $P_7 = 0{,}85$ $P_8 = 0{,}60$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}97$
19		$P_1 = 0{,}60$ $P_2 = 0{,}75$ $P_3 = 0{,}50$ $P_4 = 0{,}80$ $P_5 = 0{,}80$ $P_6 = 0{,}90$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}86$
20		$P_1 = 0{,}60$ $P_2 = 0{,}65$ $P_3 = 0{,}70$ $P_4 = 0{,}75$ $P_5 = 0{,}80$ $P_6 = 0{,}75$ $P_7 = 0{,}85$ $P_8 = 0{,}90$	$P_\Sigma =$ $= 0{,}94$

Розділ 9. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад № 1

На випробування поставлено 400 пристроїв ($N_0 = 400$). За 3000 годин ($t = 3000$ год) відмовило 200 пристроїв ($n(t) = 200$), а після цього за інтервал часу 4000 годин ($\Delta t = 4000$ год) відмовило ще 100 пристроїв ($\Delta n = 100$).

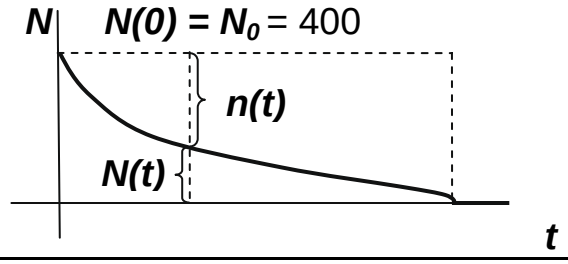
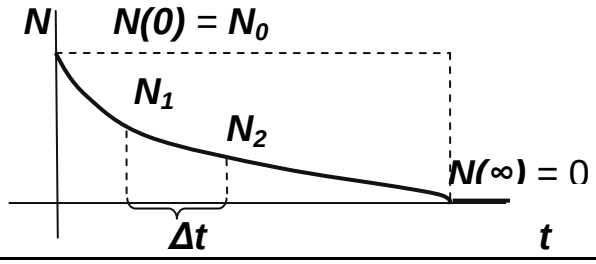
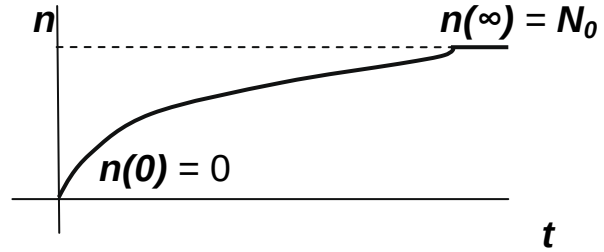
Визначити ***P(3000), P(7000), P(5000), a(5000), λ(5000).***

Розв'язання

Для наочності побудуємо графіки кількості справних пристроїв і пристроїв, що відмовили (табл. 9.1).

Таблиця 9.1

Графіки кількості пристроїв

Графік кількості справних пристроїв $N(t)$ 	Графік кількості справних пристроїв $N(t)$ 
Графік кількості пристроїв, що відмовили, $n(t)$ 	$N_0 = 400$, $n_0 = 0$, $N_1 = 200$, $n_1 = 200$, $N_2 = 100$, $n_2 = 300$, $N_1 - N_2 = \Delta N = \Delta n = 100$ Розрахунок $N_{сер}$: $N_{сер} = \frac{N_1 + N_2}{2} = 150$

1. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристроїв.

На початку інтервалу (3000 год)

$$P(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400-200}{400} = 0{,}5;$$

Наприкінці інтервалу (7000 год)

$$P(7000) = \frac{N_0 - n(7000)}{N_0} = \frac{400-300}{400} = 0{,}25.$$

Кількість відмов пристроїв за час $t = 5000$ год (у середині інтервалу)

$$n(5000) = N_0 - N_{сер} = 400 - 150 = 250.$$

Імовірність безвідмовної роботи в середині інтервалу

$$P(5000) = \frac{N_0 - n(5000)}{N_0} = \frac{400 - 250}{400} = 0{,}375.$$

2. Знайдемо частоту відмов пристроїв в середині інтервалу:

$$a(5000) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_0} = \frac{100}{4000 \cdot 400} = 0{,}625 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год.}$$

3. Знайдемо інтенсивність відмов пристроїв в середині інтервалу:

$$\lambda(5000) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_{сер}} = \frac{100}{4000 \cdot 150} \approx 1{,}67 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год.}$$

Можна також скористатися формулою

$$\lambda(5000) = \frac{\bar{a}(5000)}{\bar{P}(5000)} \approx \frac{0{,}0000625}{0{,}375} \approx 1{,}67 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год.}$$

Приклад № 2

Випробуванням піддавалося 1000 зразків невідновних пристроїв ($N_0 = 1000$). Кількість відмов Δn фіксувалася через кожні 100 год роботи ($\Delta t = 100$ год).

Визначити кількісні характеристики надійності пристроїв і побудувати графіки залежності цих характеристик від часу.

Дані про відмови пристроїв наведено в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Дані про відмови пристроїв

Δt_i, год	Δn	Δt_i, год	Δn	Δt_i, год	Δn
0-100	50	1000-1100	15	2000-2100	12
100-200	40	1100-1200	14	2100-2200	13
200-300	32	1200-1300	14	2200-2300	12
300-400	25	1300-1400	13	2300-2400	13
400-500	20	1400-1500	14	2400-2500	14
500-600	17	1500-1600	13	2500-2600	16
600-700	16	1600-1700	13	2600-2700	20
700-800	16	1700-1800	13	2700-2800	25
800-900	15	1800-1900	14	2800-2900	30
900-1000	14	1900-2000	12	2900-3000	40

Розв'язання

Пристрої належать до невідновних, тому критерії їх надійності виберемо $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$, $T_{сер}$.

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристроїв $P(t)$:

$$\bar{P}(100)=\frac{N_0-n(100)}{N_0}=\frac{1000-50}{1000}=0{,}95;$$

$$\bar{P}(200)=\frac{1000-90}{1000}=0{,}91;$$

$$\ldots\ldots\ldots$$

$$\bar{P}(3000)=\frac{1000-575}{1000}=0{,}425.$$

Знайдемо частоту відмов $a(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$ пристроїв:

$$\bar{a}(50)=\frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_0}=\frac{50}{100 \cdot 1000}=0{,}5\cdot 10^{-3} \text{ відм./год};$$

$$\bar{a}(150)=\frac{40}{100 \cdot 1000}=0{,}4\cdot 10^{-3} \text{ відм./год};$$

$$\ldots\ldots\ldots$$

$$\bar{a}(2950)=\frac{40}{100 \cdot 1000}=0{,}4\cdot 10^{-3} \text{ відм./год};$$

$$\bar{\lambda}(50)=\frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_{сер}}=\frac{50}{100 \cdot (1000+950)/2}=0{,}514\cdot 10^{-3} \text{ відм./год};$$

$$\bar{\lambda}(150)=\frac{40}{100 \cdot (950+910)/2}=0{,}43\cdot 10^{-3} \text{ відм./год};$$

$$\ldots\ldots\ldots$$

$$\bar{\lambda}(2950)=\frac{40}{100 \cdot (465+425)/2}=0{,}9\cdot 10^{-3} \text{ відм./год}.$$

Значення $P(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$, обчислені для всіх Δt_i, наведено в табл. 9.3.

Слід мати на увазі, що в цій таблиці значення $P(t)$ наведено для кінців інтервалів Δt_i, а значення $a(t)$, $\lambda(t)$ − для середини інтервалів Δt_i. Тому розрахунок $P(t)$ не дасть значень, наведених у табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Розраховані значення ***P(t), a(t), λ(t)***

Δt_i, *год*	***P(t)***	$a(t)\cdot 10^{-3}$, *відм./год*	$\lambda(t)\cdot 10^{-3}$, *відм./год*
0-100	0.950	0.50	0.514
100-200	0.910	0.40	0.430
200-300	0.878	0.32	0.358
300-400	0.853	0.25	0.289
400-500	0.833	0.20	0.238
500-600	0.816	0.17	0.206
600-700	0.800	0.16	0.198
700-800	0.784	0.16	0.202
800-900	0.769	0.15	0.193
900-1000	0.755	0.14	0.184
1000-1100	0.740	0.15	0.200
1100-1200	0.726	0.14	0.191
1200-1300	0.712	0.14	0.195
1300-1400	0.699	0.13	0.184
1400-1500	0.685	0.14	0.202
1500-1600	0.672	0.13	0.192
1600-1700	0.659	0.13	0.195
1700-1800	0.646	0.13	0.200
1800-1900	0.632	0.14	0.220
1900-2000	0.620	0.12	0.192
2000-2100	0.608	0.12	0.195
2100-2200	0.595	0.13	0.217
2200-2300	0.583	0.12	0.204
2300-2400	0.570	0.13	0.225
2400-2500	0.556	0.14	0.248
2500-2600	0.540	0.16	0.290
2600-2700	0.520	0.20	0.376
2700-2800	0.495	0.25	0.490
2800-2900	0.465	0.30	0.624
2900-3000	0.425	0.40	0.900

У цьому випадку кількість доданків становить

$$m = t_{max} = 3000/100 = 30.$$

Для розрахунків середнього часу безвідмовної роботи використаємо лише ті зразки, які відмовили. Це 575 зразків із 1000, підданих випробуванням:

$$n_{max} = 575.$$

Обчислимо середній час безвідмовної роботи:

$$T_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i t_{серi}}{n_{max}} = \frac{50 \cdot 50+40 \cdot 150+32 \cdot 250+...+30 \cdot 2850+40 \cdot 2950}{575} \approx 1400 \text{ год.}$$

Значення середнього наробку на першу відмову є заниженим, оскільки дослід було припинено після відмови 575 зразків із 1000, підданих випробуванням.

Для наочності побудуємо графіки визначених залежностей (рис. 9.1, 9.2).

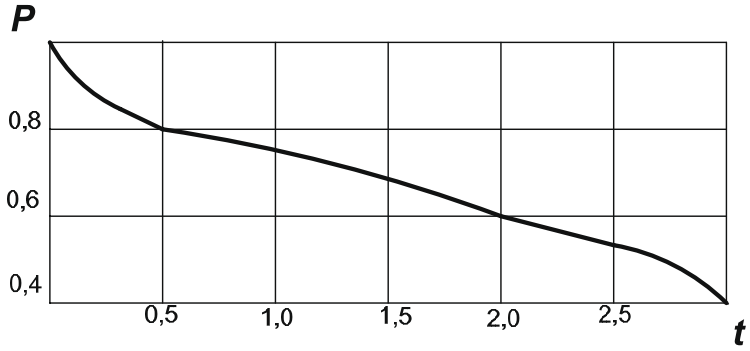


Рис. 9.1. Залежність ***P(t)***

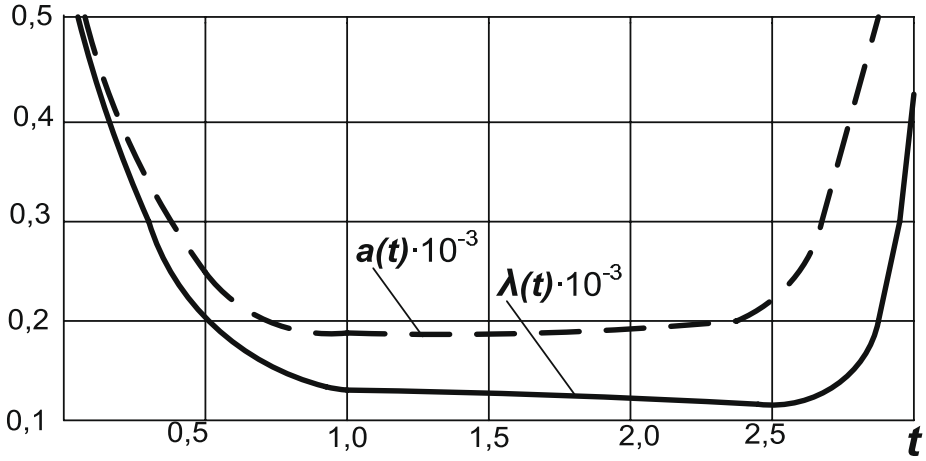


Рис. 9.2. Залежності ***a(t), λ(t)***

Приклад № 3

Обчислювальна система складається з п'яти пристроїв. Відмова будь-якого з них спричиняє відмову системи. Відомо, що перший пристрій відмовив 34 рази протягом 952 год роботи, другий − 24 рази протягом 960 год роботи, а решта пристроїв протягом 210 год роботи відмовили 4, 6 і 5 разів відповідно. Визначити наробок на відмову системи в цілому, якщо надійність кожного з п'яти пристроїв підпорядковується експоненціальному закону.

Розв'язання

Для розв'язання цієї задачі скористаємося такими співвідношеннями:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \; ; \quad T_{сер} = \frac{1}{\lambda}$$

1. Визначимо інтенсивність відмов для кожного пристрою:

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{34}{952} = 0{,}0357 \text{ відм./год}; \qquad \bar{\lambda}_2 = \frac{24}{960} = 0{,}025 \text{ відм./год};$$

$$\bar{\lambda}_{3,4,5} = \frac{4+6+5}{210} = 0{,}0714 \text{ відм./год}.$$

2. Інтенсивність відмов системи

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3,4,5} = 0{,}0357 + 0{,}025 + 0{,}0714 = 0{,}1321 \text{ відм./год}.$$

3. Середній наробок на відмову системи

$$T_{сер\Sigma} = \frac{1}{\lambda_\Sigma} \approx \frac{1}{0{,}1321} \approx 7{,}6 \text{ год}.$$

Приклад № 4

Система складається з 2500 елементів ($N = 2500$), імовірність її безвідмовної роботи протягом однієї години становить $P_\Sigma(1) = 98\,\%$. Передбачається, що всі елементи є рівнонадійними. Обчислити середній наробок на першу відмову системи $T_{сер}$, імовірність безвідмовної роботи системи протягом 100 год $P_\Sigma(100)$, інтенсивність відмов одного елемента системи λ_1.

Чи можна без спеціальних засобів підвищення надійності спроектувати систему з показником надійності $T_{сер\Sigma} = 50000$ год?

Розв'язання

Для розв'язання цієї задачі скористаємося такими співвідношеннями:

$$P = e^{-\lambda \cdot t}, \quad \lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \quad T = \frac{1}{\lambda}.$$

1. Інтенсивність відмов системи

$$\lambda_\Sigma = -\ln(P_\Sigma(t))/t = -\ln(P_\Sigma(1))/1 = -\ln(0{,}98) \approx 0{,}0202 \text{ відм./год}.$$

2. Середній наробок на першу відмову системи

$$T_{сер\Sigma} = \frac{1}{\lambda_\Sigma} = \frac{1}{0{,}0202} \approx 50 \text{ год}.$$

3. Імовірність безвідмовної роботи системи протягом 100 год

$$P_\Sigma(100) = e^{-\lambda \cdot 100} \approx e^{-0{,}0202 \cdot 100} \approx 0{,}13 .$$

4. Визначимо інтенсивність відмов для одного елемента системи:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_\Sigma}{N} \approx \frac{0{,}0202}{2500} \approx 8\cdot10^{-6} \text{ відм./год.}$$

5. Оцінимо інтенсивність відмов наднадійної системи з показником $T_{сер\Sigma} = 50000$ *год*:

$$\lambda_\Sigma = \frac{1}{T_{сер\Sigma}} = \frac{1}{50000} = 0{,}00002 \text{ відм./год.}$$

6. Інтенсивність відмов для кожного елемента цієї наднадійної системи

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_\Sigma}{N} \approx \frac{0{,}00002}{2500} \approx 8\cdot10^{-9} \text{ відм./год.}$$

Оцінимо дані про інтенсивності відмов елементів, що забезпечуються сучасним станом промислового виробництва. Такі високі вимоги до надійності елементів ($\lambda > 1\cdot10^{-9}$) є нездійсненними.

Це означає, що систему з показником надійності $T_{сер\Sigma} = 50000$ год неможливо спроектувати.

Приклад № 5

Виконувалося спостереження за роботою трьох екземплярів однотипної апаратури. За період спостереження було зафіксовано по першому екземпляру апаратури шість відмов, по другому і третьому − 11 і 8 відмов відповідно. Наробок на відмову першого екземпляра становить 181 год, другого − 329 год, третього − 245 год.

Визначити наробок на відмову апаратури.

Розв'язання

1. Визначимо сумарну кількість відмов за формулою

$$n_\Sigma = \sum_{j=1}^{N} n_j = 6 + 11 + 8 = 25.$$

2. Обчислимо сумарний наробок на відмову трьох зразків апаратури:

$$t_\Sigma = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{j} t_{ij} = 181 + 329 + 245 = 755 \text{ год.}$$

3. Знайдемо середній наробок на відмову:

$$T_{сер} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{N} n_j} = \frac{t_\Sigma}{n_\Sigma} = \frac{755}{25} = 30{,}2 \text{ год.}$$

Приклад № 6

Задано резервовану систему, структурну схему якої зображено на рис. 9.3. Для наочності розрахунків узяти такі показники безвідмовності, однакові для всіх дванадцяти елементів цієї системи:

– $\boldsymbol{\lambda_0} = 1 \cdot 10^{-4}$ відм./год – інтенсивність відмов одного елемента;

⇕

– $\boldsymbol{P_0(1000)} = e^{-0,1} \approx 0,9$ – імовірність безвідмовної роботи цього елемента через 1000 год.

Оцінити безвідмовність роботи системи за відомими характеристиками безвідмовності її елементів.

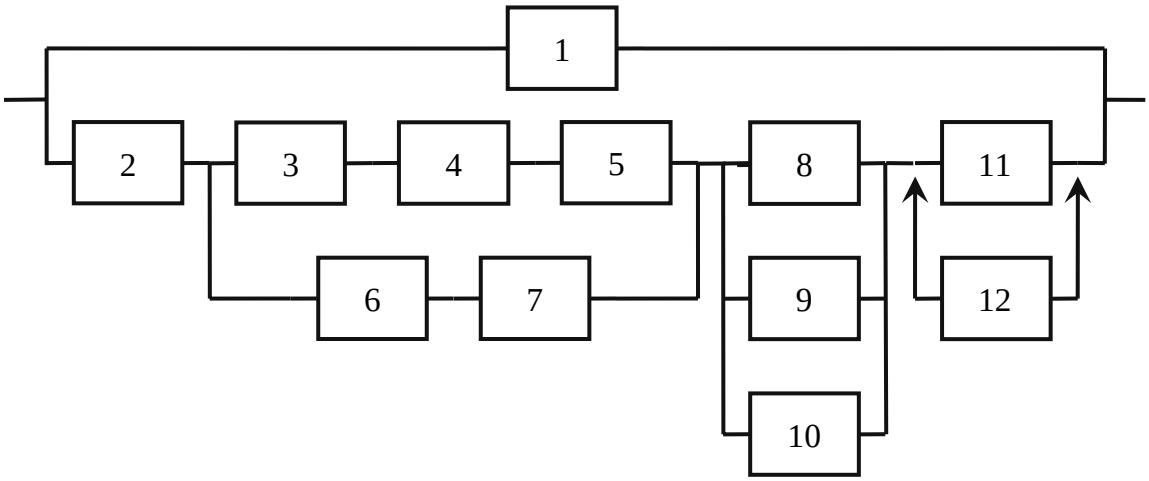


Рис. 9.3. Структурна схема системи з огляду на надійність

Розв'язання

На схемі видно, що система складається з двох паралельно з'єднаних нерівнонадійних вузлів – 1 і 2–12.

Вузол 1 являє собою один елемент.

Вузол елементів 2–12, у свою чергу, складається з чотирьох вузлів:

– 2 – вузол, що являє собою один нерезервований елемент;

– 3–7 – вузол з постійно підключеним резервом, причому основна частина цього вузла 3–5 складається з трьох послідовно з'єднаних елементів, а гарячий резерв 6–7 – з двох елементів;

– 8–10 – вузол, резервований з кратністю $\boldsymbol{K} = 1/2$ (оскільки на схемі цього не видно, особливо слід звернути увагу, що для роботи системи необхідними є два основні елементи, і лише один елемент із трьох знаходиться в гарячому резерві);

– 11–12 – вузол з основним елементом 11 і холодним резервом 12.

Для розрахунків можна обмежено скористатися відомими співвідношеннями:

$$\lambda = const,\ P = e^{-\lambda \cdot t},\ T_{сер} = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{T_{сер}},\ \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \ .$$

Цей спрощений математичний апарат, характерний для експоненціальної моделі, тут можна використовувати як для кожного окремого елемента, наприклад 1 або 2, так і для двох ділянок структурної схеми з послідовно з'єднаними елементами: 3–5 і 6–7. Для цих ділянок

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год;}$$

$$\lambda_{3\text{-}5} = \Sigma\lambda = 3\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год;}$$

$$\lambda_{6\text{-}7} = \Sigma\lambda = 2\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ відм./год.}$$

За цими співвідношеннями можна визначити будь-який показник безвідмовності цих ділянок схеми у будь-який момент часу.

Оцінка безвідмовності всієї резервованої системи полягає в послідовному розрахунку ймовірності $P_{\Sigma} = P_{1\text{-}12}$ в кожний момент часу t окремо.

Один розрахунок імовірності $P_{\Sigma}(1000)$ для моменту часу 1000 год розглянемо далі, причому для спрощення запису для всіх рівнонадійних елементів системи візьмемо $P_1 = P_2 = \ldots = P_{12} = P_0(1000) = P$.

Оцінимо ймовірність безвідмовної роботи всіх вузлів по черзі.

Для одного елемента 1:

$$P_1 = P = 0{,}9.$$

Також для одного нерезервованого вузла 2:

$$P_2 = P = 0{,}9.$$

Для вузла з послідовно з'єднаними елементами 3–5:

$$P_{3\text{-}5} = P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 = 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \approx 0{,}73.$$

Для вузла з послідовно з'єднаними елементами 6–7:

$$P_{6\text{-}7} = P_6 \cdot P_7 = 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 0{,}81.$$

Для першого резервованого вузла 3–7:

$$P_{3\text{-}7} = 1 - (1 - P_{3\text{-}5}) \cdot (1 - P_{6\text{-}7}) \approx 1 - 0{,}27 \cdot 0{,}19 \approx 0{,}95.$$

Оскільки у вузлі 8–10 застосовано гаряче резервування з дробовою кратністю (із трьох елементів два основних і один резервний), для цього вузла

$$P_{8\text{-}10} = \sum_{i=0}^{k-h} C_k^i P^{k-i} \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^j P^j .$$

У цьому вузлі основних елементів $h = 2$, а всього елементів $k = 3$. Тоді

$$P_{8\text{-}10} = \sum_{i=0}^{1} C_3^i P^{3-i} \sum_{j=0}^{i} (-1)^j C_i^j P^j =$$

$$= C_3^0 P^3 \sum_{j=0}^{0} (-1)^j C_0^j P^j + C_3^1 P^2 \sum_{j=0}^{1} (-1)^j C_1^j P^j .$$

Підсумковий результат для вузла 9–11:

$$P_{8\text{-}10} = \frac{3!}{0!3!} P^3 \left((-1)^0 \frac{0!}{0!0!} P^0 \right) + \frac{3!}{1!2!} P^2 \left((-1)^0 \frac{1!}{0!1!} P^0 + (-1)^1 \frac{1!}{1!0!} P^1 \right) =$$

$$= P^3 + 3P^2(1-P) = P^3 + 3P^2 - 3P^3 = 3P^2 - 2P^3 = 3\cdot 0{,}9^2 - 2\cdot 0{,}9^3 \approx 0{,}972.$$

Для вузла 11–12 з холодним резервом

$$P_{11\text{-}12} = P_{сер} \sum_{j=0}^{m} \frac{(-\ln P_{сер})^j}{j!} .$$

У цьому виразі середнє значення ймовірності безвідмовної роботи основного й резервного елементів дорівнює $P_{сер} = P = 0{,}9$, а кратність загального резервування заміщенням $K = 1$. Тоді

$$P_{11\text{-}12} = P_{сер} \sum_{j=0}^{1} \frac{(-\ln P)^j}{j!} \approx 0{,}9 \left(\frac{0{,}1^0}{0!} + \frac{0{,}1^1}{1!} \right) \approx 0{,}9(1+0{,}1) \approx 0{,}99.$$

Підсумковий результат для вузла 2–12:

$$P_{2\text{-}12} = P_2 P_{3\text{-}7} P_{8\text{-}10} P_{11\text{-}12} = 0{,}9\cdot 0{,}95\cdot 0{,}972\cdot 0{,}99 \approx 0{,}823.$$

Імовірність безвідмовної роботи резервованої системи

$$P_{1\text{-}12} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_{2\text{-}12}) \approx 1 - 0{,}1\cdot 0{,}177 \approx 0{,}98.$$

Не слід забувати, що це ймовірність безвідмовної роботи системи в один вибраний момент часу − через 1000 год після початку експлуатації:

$$P_\Sigma(1000) = P_{1\text{-}12} \approx 98\ \%.$$

Такий досить високий показник безвідмовності було отримано завдяки резервуванню з елементів із низькими вихідними показниками для однієї ланки:

$$P = P_0(1000) = 90\ \%.$$

Додаток 1

ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІДМОВ ВИРОБІВ ЗГІДНО З ДАНИМИ VII, VIII І IX СИМПОЗІУМІВ США

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Максимальна	Середня	Мінімальна
Автопілоти		30,11	18,38	7,35
Акселерометри		7,5	2,8	0,35
Акселерометри тензометричні		21,4	8,0	1,00
Акумулятори		19,3	7,2	0,35
Амортизатори кільцеві		0,057	0,037	0,002
Амперметри		—	0,29	—
Антени		3,25	0,36	0,2
Антени слідкувальні		10,04	5,7	1,36
Антенні перемикачі		5,38	4,0	3,23
Арматура освітлювальна		0,71	0,1	0,04
Батареї:	кислотно-свинцеві	12,1	1,1	0,5
	одноразові (сухі)	300	30	10
	зарядні	14,29	1,40	0,50
Вентилятори витяжні		9,0	0,295	0,21
Хвилеводи:	гнучкі	4,54	2,64	1,133
	жорсткі	1,92	1,1	0,59
Виводи:	високочастотні	4,22	2,63	1,131
	електричні	0,08	0,045	0,02
Вимикачі:	автоматичні	0,4	0,138	0,045
	автоматичні теплові	0,50	0,30	0,25
	важільні типу «Тумблер»	0,123	0,06	0,015
	швидкодіючі	2,1	0,4	0,09
Випрямлячі:	різні	0,75	0,6	0,20
	селенові	1,6	0,76	0,26
Вібратори:	несинхронні	1,84	1,15	0,92
	різні	1,6	0,875	0,2
	синхронні	0,8	0,5	0,4
Відмітники часу:	електромеханічні	2,57	1,5	0,79
	електронні	1,8	1,2	0,24
	механічні (лічильники)	2,57	0,24	0,04
Генератори:	звукової частоти	0,56	0,35	0,14
	змінного струму	2,94	0,7	0,033
	опорні	2,5	0,938	0,045
	постійного струму	6,27	0,9	0,30
Гіроскопи:	високошвидкісні	11,45	7,5	3,95
	компасні	—	3,82	—
	особливо точні (еталонні)	25	10,0	2,5

Продовження дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Макси-мальна	Середня	Міні-мальна
Гнізда (на один контакт)		0,02	0,01	0,002
Головки запису (магнітні)		0,26	0,18	0,13
Двигуни гідравлічні		7,15	4,3	1,45
Детектори кристалічні		0,371	0,20	0,03
Диференціали		1,58	1,0	0,012
Діоди:	германієві	0,678	0,157	0,002
	кремнієві	0,452	0,2	0,021
	кремнієві карбідні	0,55	0,1	0,002
	потужні	3,0	1,42	0,018
	селенові	0,6	0,2	0,11
Дроселі:	анодні	0,09	0,02	0,005
	високої частоти	4,75	2,1	0,056
	з насиченням	0,320	0,14	0,12
	зарядні	2,220	1,388	0,555
	низької частоти	0,280	0,175	0,070
Проводи сполучні (між елементами)		0,12	0,015	0,008
Електродвигуни:	асинхронні	11,2	8,6	4,49
	вентиляторів	5,5	0,2	0,05
	змінного струму	9,36	5,24	1,12
	крокові	0,71	0,37	0,22
	постійного струму	9,36		
	синхронні	6,25	0,359	0,159
Електронні лампи:				
	генераторні імпульсні	43,0	30,0	20,0
	мікрохвильові	32,0	20,0	9,7
	передавальні	175,0	58,2	3,8
	приймальні	3,24	2,0	1,5
	приймально-підсилювальні	2,6	1,7	1,1
	приймально-підсилювальні потужні	9,45	7,05	2,17
Запобіжники:	дротяні	0,83	0,5	0,38
	плавкі	2,75	0,5	0,001
Запобіжників тримачі		0,10	0,02	0,008
Затискачі		0,001	0,0005	0,0003
З'єднання:	гідравлічні	2,01	0,03	0,012
	гнучкі	1,348	0,688	0,027
	жорсткі	0,049	0,025	0,001
	механічні	1,96	0,02	0,011
	паяні	0,005	0,004	0,0002
	пневматичні	1,15	0,04	0,021
	шарнірні	4,0	2,4	0,80

Продовження дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Макси-мальна	Середня	Міні-мальна
Ізолятори		0,08	0,05	0,03
Кабелі		2,2	0,475	0,002
Клапани:	поплавкові	11,2	8,0	5,6
	сервомеханізмів	56,0	30,0	16,8
Компаси магнітні		—	8,66	—
Конденсатори:	електролітичні	0,513	0,035	0,003
	електролітичні алюмінієві	0,425	0,135	0,02
	керамічні	0,213	0,1	0,063
	масляні	1,95	0,3	0,12
	паперові	0,29	0,05	0,003
	паперові до 600 В	0,04	0,025	0,01
	паперові вище 600 В	0,235	0,09	0,0083
	паперові нейлонові	0,014	0,01	0,006
	повітряні змінні	0,082	0,034	0,01
	постійної ємності до 600 В	0,018	0,01	0,001
	постійної ємності вище 600 В	0,486	0,27	0,027
	постійної ємності вище 1000 В	2,385	0,325	0,1325
	слюдяні	0,132	0,075	0,005
	слюдяні до 600 В	0,066	0,038	0,009
	скляні	0,87	0,06	0,0005
	танталові	1,934	0,6	0,103
	танталові фольгові	0,5	0,117	0,001
	фарфорові високовольтні	1,02	0,09	0,04
Контакти перериві		0,8	0,5	0,31
Контактори (на контактну групу)		0,4	0,25	0,1
Коробки сполучні		0,58	0,4	0,28
Котушки:	високої частоти	0,05	0,01	0,005
	дросельні	0,100	0,02	0,01
	індуктивності	0,031	0,02	0,011
	індуктивності високої напруги	0,73	0,40	0,07
	індуктивності соленоїдні	0,091	0,04	0,02
	настроювальні	0,287	0,15	0,0142
	обмоток моторів	0,045	0,03	0,01
Кріпильні деталі монтажні		0,55	0,012	0,003
Кульки термометрів		3,30	1,0	0,05
Лампи:	неонові жевріючого розряду	18,8	10,25	4,50
	розжарювання	32,0	8,0	5,0
Лінії:	затримки змінного струму	4,62	3,00	0,22
	затримки постійного струму	0,25	0,1	0,08

Продовження дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Максимальна	Середня	Мінімальна
Лічильники електричні:				
	змінного струму	0,035	0,026	0,021
	постійного струму	0,40	0,036	0,017
Магніти		7,11	5,65	2,02
Манометри		7,8	4,0	0,135
Муфти:	електромагнітні	0,93	0,6	0,24
	управління перемикальні	3,2	1,69	0,065
	фрикційні запобіжні	0,94	0,3	0,07
Насоси		24,3	13,5	2,7
Насоси вакуумні		16,1	9,0	1,12
Осі		0,62	0,35	0,15
Панелі:	електронних ламп (на одне гніздо)	0,009	0,005	0,002
	модульні (на одне гніздо)	—	0,024	—
Передачі:	зубчасті гвинтові	0,098	0,05	0,002
	зубчасті редукторів	0,36	0,2	0,11
	зубчасті сектори	1,8	0,913	0,051
	зубчасті циліндрові	4,3	2,175	0,087
Перемикачі (на одну контактну групу):				
	блокувальні	1,0	0,5	0,25
	з приводом від двигуна	0,292	0,19	0,128
	кнопкові	0,11	0,7	0,043
	кулачкові	0,12	0,075	0,048
	мікромініатюрні	0,5	0,25	0,09
	плунжерні	0,112	0,054	0,041
	хвилеводні	0,71	0,48	0,26
	чутливі великі	0,072	0,045	0,121
	чутливі малі	0,124	0,06	0,045
	швидкодіючі	5,38	4,0	0,476
Переривники (зумери)		1,3	0,6	0,05
Підшипники:	ковзання	0,42	0,22	0,008
	кулькові високошвидкісні важкої серії	3,53	1,8	0,072
	кулькові низькошвидкісні легкої серії	1,72	0,875	0,035
	роликові	1,0	0,5	0,02
Поводки сельсинні		—	0,24	—
Повітродувки		3,57	2,4	0,342

Продовження дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Максимальна	Середня	Мінімальна
Потенціометри:	вугільні	4,44	0,25	0,1
	дротяні	2,0	1,2	0,72
	дротяні мініатюрні	2,02	1,21	0,81
	з приводом від двигуна	12,60	5,485	1,71
	композиційні	0,3	0,1	0,04
	лічильно-розв'язувальних механізмів	14,7	5,0	1,18
Приводи:	загального призначення великогабаритні	18,5	6,9	0,6
	загального призначення малогабаритні	9,6	3,6	0,17
	ремінні	15,0	3,875	0,142
	слідкувальних систем	33,6	12,5	0,86
Прокладки:	гумові	0,03	0,02	0,011
	кільцеві	0,035	0,02	0,01
	пробкові	0,077	0,04	0,003
	просочені	0,225	0,137	0,05
	сіткові	0,908	0,05	0,0022
	фенолові	0,07	0,05	0,01
	шайби	0,015	0,001	0,0005
Пружини:	зворотні	0,022	0,012	0,001
	калібровані	0,42	0,22	0,09
Пускачі, стартери		16,1	10,0	3,03
Регулятори напруги вугільні		13,16	9,65	6,09
Резистори:	вугільні	0,898	0,045	0,005
	вугільні композиційні	0,297	0,043	0,005
	дротяні	0,165	0,087	0,046
	дротяні змінні	0,807	0,09	0,02
	дротяні потужні	0,076	0,04	0,021
	дротяні точні	0,191	0,091	0,052
	композиційні змінні	0,533	0,053	0,007
	металоплівкові	0,4	0,04	0,004
	нелінійні (тирити)	0,153	0,10	0,047
	плівкові	0,058	0,03	0,0017
	постійні	0,07	0,03	0,01
	постійні багатоватні	0,065	0,028	0,009

Продовження дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Максимальна	Середня	Мінімальна
Реле (на одну контактну групу):				
	високочутливі	0,89	0,40	0,22
	герметично закриті	0,19	0,04	0,02
	електромагнітні	0,5	0,3	0,11
	затримки часу	0,749	0,39	0,156
	з соленоїдними котушками	0,81	0,5	0,30
	малогабаритні	0,54	0,25	0,145
	мілісекундні	0,84	0,44	0,18
	мініатюрні	0,25	0,06	0,03
	мініатюрні швидкодіючі	1,13	0,7	0,42
	потужні	4,10	0,30	0,15
	термічні	1,0	0,4	0,12
Реле часу:	електромеханічні	2,57	1,50	0,79
	електронні	1,80	1,20	0,24
	пневматичні	6,80	3,5	1,15
Реостати		0,19	0,13	0,07
Рознімні з’єднання (на один контакт):				
	штепсельні бананові	1,11	0,062	0,025
	штепсельні з ковзаючим контактом	0,03	0,002	0,0011
	штепсельні змінного струму	0,05	0,003	0,001
	штепсельні коаксіальні	0,193	0,003	0,001
	штепсельні телефонні	0,04	0,002	0,001
Серводвигуни		5,61	1,51	0,101
Сельсини:	розв’язувальних пристроїв	1,14	1,113	0,29
	синхронних передач	0,61	0,35	0,09
Соленоїди		0,55	0,05	0,036
Стабілізатори напруги:				
	вугільні	13,16	9,65	6,09
	магнітних підсилювачів	0,69	0,5	0,37
Схеми затримки імпульсів		0,96	0,6	0,24
Тахометри		0,55	0,3	0,25
Тензометри		15,0	11,6	1,01
Термовимикачі (на одну контактну групу)		0,261	0,161	0,114
Транзистори:	германієві	1,91	0,3	0,04
	германієві потужні	1,4	0,6	0,33
	кремнієві	1,44	0,5	0,27
	перемикачі	0,71	0,4	0,1
	підсилювачі	0,84	0,5	0,31

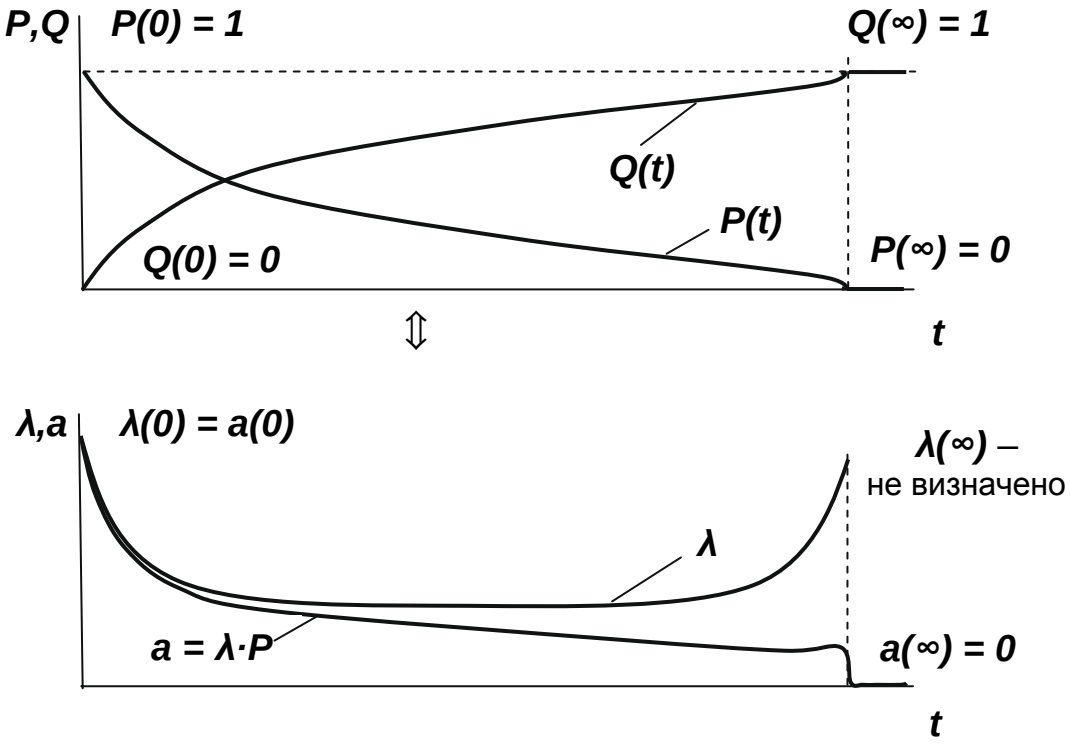
Закінчення дод. 1

Назва виробу		Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$, *відм./год*		
		Макси-мальна	Середня	Міні-мальна
Трансформатори:	анодні	0,052	0,025	0,012
	вихідні	0,2	0,09	0,04
	високочастотні	0,062	0,045	0,019
	вхідні	2,08	1,09	0,12
	звукової частоти	0,04	0,02	0,01
	імпульсні	0,235	0,17	0,03
	імпульсні високої напруги	0,235	0,15	0,065
	магнітних підсилювачів	0,485	0,152	0,052
	проміжної частоти	0,31	0,08	0,02
	розжарювання	0,06	0,027	0,013
	силові	2,08	1,04	0,46
	силові високої напруги	1,88	0,94	0,407
	розв'язувальні	0,093	0,03	0,011
Тримачі плавких запобіжників		0,10	0,02	0,008
Умформери		5,46	2,8	1,15
Ущільнення:	ковзні	0,92	0,3	0,11
	обертові	1,12	0,7	0,25
Фільтри:	електричні	3,0	0,345	0,140
	механічні	0,80	0,30	0,045
	світлові	0,80	0,20	0,12
Шестерінчастий зуб, кулачок, палець, собачка, защіпка		0,004	0,002	0,001
Штифт		2,6	1,625	0,65
Шукачі лінійні перевірочні		0,082	0,05	0,02
Щітки електричні:	обертових пристроїв	1,11	0,1	0,04
	сполучені із затискачами	1,02	0,063	0,01
Щіткотримачі		4,11	1,3	0,87

Додаток 2

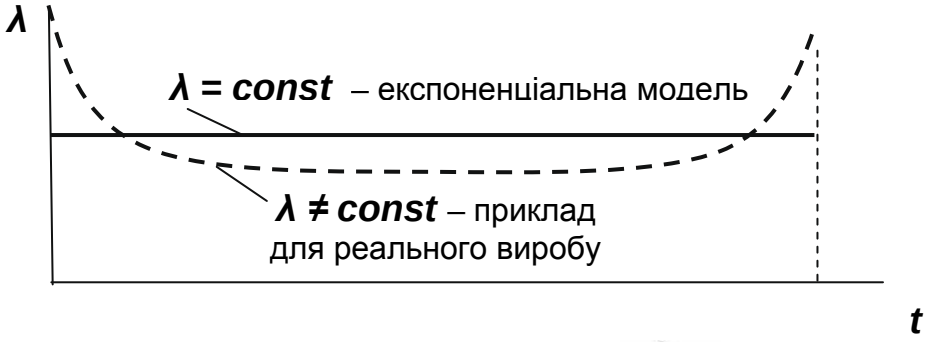
ТИПОВІ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Графічна модель



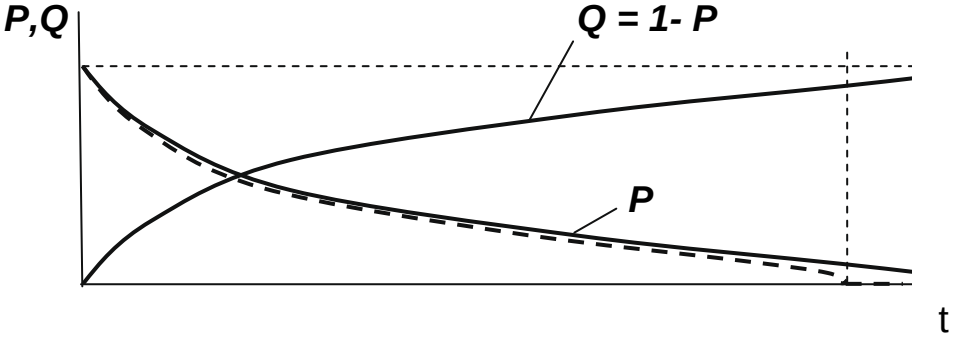
Експоненціальна модель

Модель інтенсивності відмов – константа

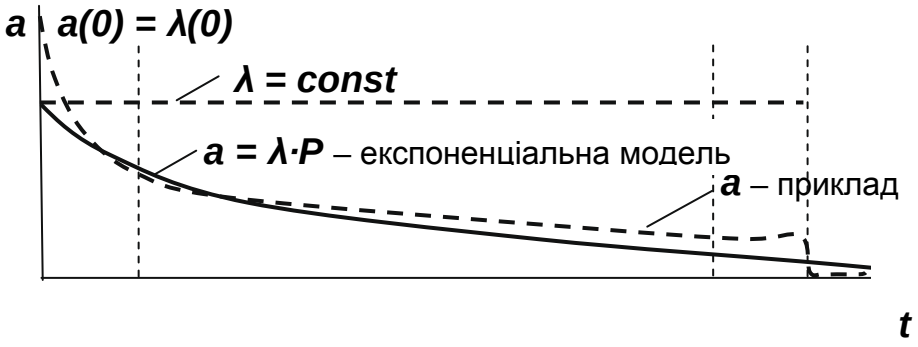


$$\lambda = const \quad \Rightarrow \int_0^t \lambda dt = \lambda \cdot t \quad \Rightarrow P = e^{-\int \lambda dt} = e^{-\lambda \cdot t}$$

Модель імовірності відмов – експонента



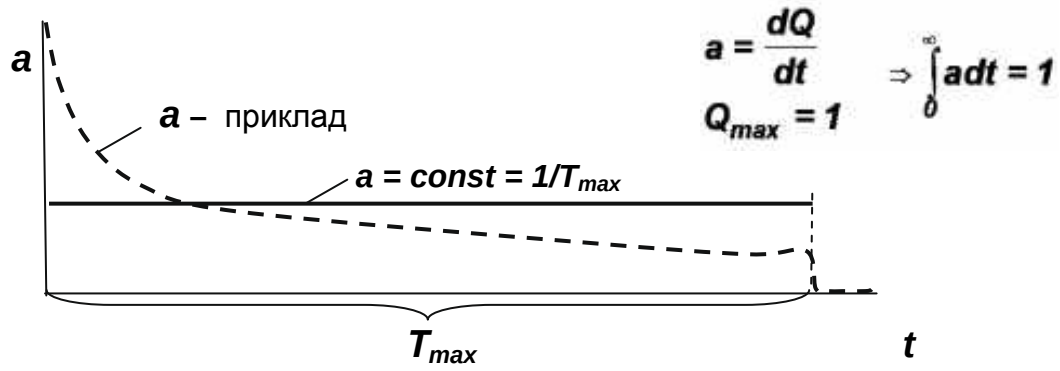
Модель частоти відмов – експонента



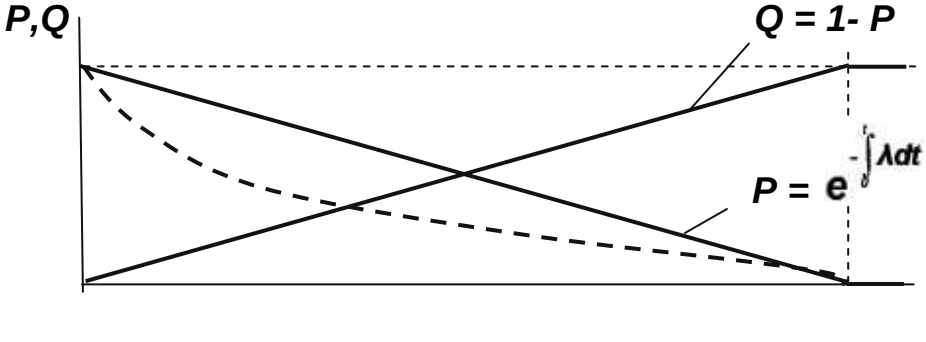
$$T_{сер} = \frac{1}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{1}{T_{сер}}$$

Рівномірна модель

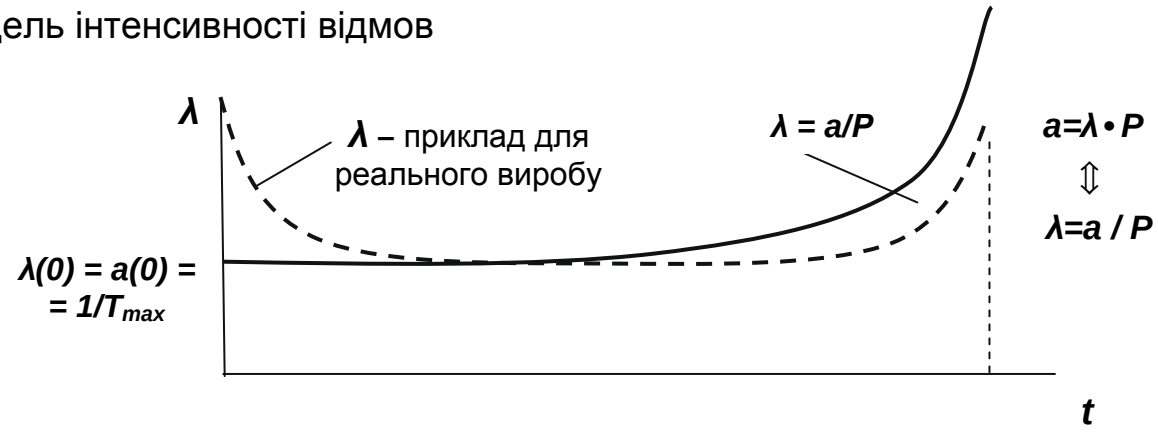
Модель частоти відмов – константа



Модель імовірності відмов –
постійно зростаюча пряма

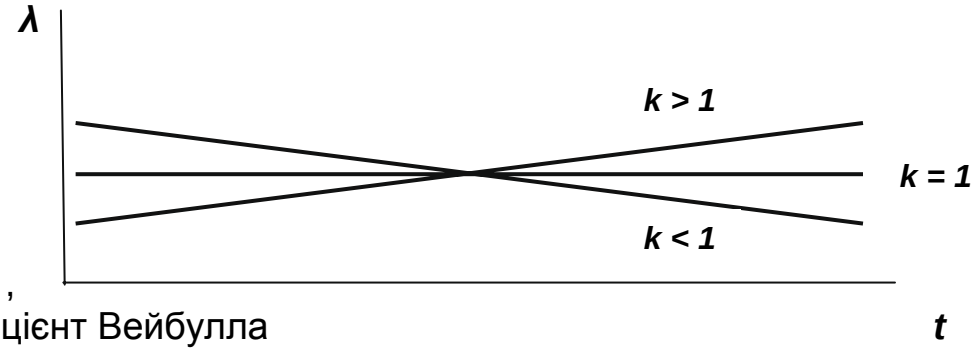


Модель інтенсивності відмов



Розподіл Вейбулла

Модель інтенсивності відмов –
пряма, уклін якої може змінюватись



$\lambda = \lambda_0 \cdot k \cdot t^{k-1}$,
де $\lambda_0 =$ const ,
k – коефіцієнт Вейбулла

Модель імовірності відмов

$$P = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} = e^{-\int_0^t \lambda_0 k t^{k-1} dt} = e^{-\lambda_0 k \int_0^t t^{k-1} dt} = e^{-\lambda_0 k t^k}$$

Модель частоти відмов

$$a(t) = \lambda P = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 k t^k}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити, що таке надійність.
2. Навести основні поняття теорії надійності.
3. Навести основні методи підвищення надійності.
4. Пояснити відмінність між одиничними і комплексними показниками надійності.
5. Пояснити, що таке відмова, як можна класифікувати відмови.
6. Пояснити, що таке безвідмовність.
7. Перелічити основні показники безвідмовності.
8. Пояснити, що таке ймовірність відмови.
9. Сформулювати математичне означення ймовірності відмови.
10. Пояснити, що таке ймовірність безвідмовної роботи.
11. Сформулювати математичне означення ймовірності безвідмовної роботи.
12. Пояснити відмінність між імовірністю відмови та ймовірністю безвідмовної роботи.
13. Пояснити, що таке частота та інтенсивність відмов.
14. Сформулювати математичне означення частоти відмов.
15. Сформулювати математичне означення інтенсивності відмов.
16. Пояснити відмінність між інтенсивностями відмов виробів під час припрацювання, нормальної експлуатації, спрацювання та старіння.
17. Пояснити відмінність між частотою й інтенсивністю відмов.
18. Навести три основні методи розрахунку безвідмовності.
19. Навести основні співвідношення для приблизного розрахунку безвідмовності складного виробу за відомими інтенсивностями відмов елементів.
20. Пояснити відмінність між приблизним та орієнтовним методами розрахунку безвідмовності.
21. Навести основні співвідношення для орієнтовного розрахунку безвідмовності.
22. Пояснити відмінність між орієнтовним та уточненим методами розрахунку безвідмовності.
23. Навести основні співвідношення для уточненого розрахунку безвідмовності.
24. Навести основні співвідношення для розрахунку впливу умов застосування й навантаження елементів виробу на його безвідмовність.
25. Перелічити основні фактори впливу на надійність виробу.
26. Пояснити відмінність між конструктивними й виробничими методами підвищення надійності виробів.
27. Пояснити, що таке резервування, перелічити основні види резервування.
28. Пояснити відмінність між загальним і роздільним резервуванням.
29. Пояснити відмінність між цілим і дробовим резервуванням.
30. Пояснити відмінність між гарячим і холодним резервуванням.
31. Навести основні співвідношення для розрахунку безвідмовності резервованих виробів при гарячому резервуванні.
32. Навести основні співвідношення для розрахунку безвідмовності резервованих виробів при холодному резервуванні.
33. Пояснити особливості метрологічної надійності.
34. Пояснити особливості надійності програмного забезпечення.
35. Пояснити особливості оцінювання надійності ремонтовних виробів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход : пер. с нем. / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М. : Радио и связь, 1988. − 391 с.

Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Сов. радио, 1969. − 488 с.

Барлоу, Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность : пер. с англ. / Р. Барлоу. – М. : Наука, 1984. − 327 с.

Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. − 524 с.

ГОСТ 27.001−95. Межгосударственный стандарт. Система стандартов «Надежность в технике». – Взамен ГОСТ 27.001−81; введ. 01.01.1997. – М. : Изд-во стандартов, 1984. − 4 с.

Гусев, К. Г. Конспект лекций по основам теории надежности / К. Г. Гусев. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1975. − 201 с.

Иыуду, К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем / К. А. Иыуду. − М. : Высш. шк., 1989. − 216 с.

Кузьмин, Ф. И. Задачи обеспечения надежности технических систем. / Ф. И. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 1982. − 176 с.

Леонтьев, Л. П. Введение в теорию надежности РЭА / Л. П. Леонтьев. – Рига : Зинатне, 1963. − 187 с.

Леонтьев, Л. П. Надежность технических систем / Л. П. Леонтьев. – Рига : Зинатне, 1969. − 266 с.

Ллойд, Д. Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат : пер. с англ. / Д. Ллойд, М. Липов. – М. : Сов. радио, 1964. − 686 с.

Меламедов, И. М. Физические основы надежности (введение в физику отказов) / И. М. Меламедов. – Л. : Энергия, 1970. − 152 с.

Надежность технических систем : справочник / под ред. Р. Барлоу. – М. : Радио и связь, 1985. − 606 с.

Окороков, В. Р. Надежность производственных систем / В. Р. Окороков. – Л. : ЛВИКА, 1972. − 167 с.

Сборник задач по основам теории надежности РЭА. – Л. : ЛВИКА, 1965. − 32 с.

Сборник задач по теории надежности / под ред. А. М. Половко, И. М. Маликова. – М. : Сов. радио, 1972. − 408 с.

Шевченко, В. И. Рабочая тетрадь по теории надежности / В. И. Шевченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. − 39 с.

Шор, Я. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Шор. – М. : Сов. радио, 1968. − 284 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 3

Розділ 1. НАДІЙНІСТЬ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ І НЕРЕМОНТОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ. ПОКАЗНИКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ . . 5

Розділ 2. СПРОЩЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ – ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНА МОДЕЛЬ БЕЗВІДМОВНОСТІ ОБ'ЄКТА 11

Розділ 3. ПРИКЛАДИ ЗМІНЕННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ВИРОБІВ ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАДІЙНОСТІ 14

Розділ 4. ВИДИ РОЗРАХУНКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ДЛЯ СКЛАДНИХ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ І НЕРЕМОНТОВАНИХ ВИРОБІВ . . 16

Розділ 5. НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ 20

Розділ 6. МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ПРОГРАМ 26

Розділ 7. НАДІЙНІСТЬ ВІДНОВНИХ (РЕМОНТОВНИХ) ОБ'ЄКТІВ 29

Розділ 8. ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ’ЯЗАННЯ 32

Розділ 9. ПРИКЛАДИ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ 45

Додаток 1. ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІДМОВ ВИРОБІВ ЗГІДНО З ДАНИМИ VII, VIII І IX СИМПОЗІУМІВ США 55

Додаток 2. ТИПОВІ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ 62

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ 66

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК 67

Навчальне видання

Кошовий Микола Дмитрович
Шевченко Володимир Іванович

НАДІЙНІСТЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2014
Підписано до друку 22.08.2014
Формат 60×84 $^{1}/_{8}$. Папір офс. № 2. Офс. друк
Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,31. Наклад 500 пр. Замовлення 281.
Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
http://www.khai.edu
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001