

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Запорізький національний технічний університет

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
**“НАДІЙНІСТЬ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ”**  
для студентів напрямку 123 ”Комп'ютерна інженерія”  
усіх форм навчання

**Частина 1: Розрахунок надійності приладів комп'ютерної техніки**

**2019 р.**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Надійність комп’ютерних систем” для студентів напряму 123 ”Комп’ютерна інженерія” усіх форм навчання. Частина 1: Розрахунок надійності приладів комп’ютерної техніки / Укл.: І.Я. Зеленьова, А.В. Сирота, Т.В. Голуб.- Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 44 с.

Укладачі: І.Я. Зеленьова, доцент, к.т.н.  
А.В. Сирота, старший викладач  
Т.В. Голуб, асистент

Рецензент М.Ю. Тягунова, доцент, к.т.н.

Відповідальний  
за випуск: Т.В. Голуб, асистент

Затверджено  
на засіданні кафедри КСМ  
Протокол № 9 від 02.04.2019

Затверджено  
на засіданні НМК КНТ  
Протокол № 9 від 26.04.2019

## ЗМІСТ

Загальні положення .....	5
1 Лабораторна робота № 1 Розрахунок основних показників надійності нерезервованих приладів комп'ютерної техніки .....	7
1.1 Основні показники надійності невідновлювальних приладів .....	7
1.1.1 Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ .....	7
1.1.2 Імовірність відмови $Q(t)$ .....	9
1.1.3 Середнє напрацювання часу на відмову .....	10
1.1.4 Інтенсивність відмов .....	10
1.1.5 Частота відмов .....	13
1.1.6 Середньоквадратична похибка імовірності безвідмовної роботи .....	14
1.1.7 Середньоквадратичне відхилення часу напрацювання на відмову .....	14
1.2 Показники надійності відновлювальних приладів .....	15
1.2.1 Середня частота відмов .....	15
1.2.2 Час відновлювання (ремонтотздатність) .....	16
1.2.3 Коефіцієнт готовності КГ .....	16
1.2.4 Стаціонарний коефіцієнт готовності .....	17
1.2.5 Коефіцієнт оперативної готовності .....	17
1.3 Математична модель надійності .....	17
1.3.1 Експоненційна модель .....	17
1.3.2 Модель Вейбула .....	19
1.3.3 Модель Пуассона .....	19
1.4 Розрахунок показників надійності нерезервованих приладів КС ..	20
1.4.1 Порядок проведення розрахунків .....	21
1.4.2 Приклад розрахунку показників надійності нерезервованих приладів ОТ .....	25
1.5 Мета роботи .....	30
1.6 Порядок проведення роботи .....	30
1.7 Обробка результатів .....	30
1.8 Контрольні запитання .....	30
2 Лабораторна робота №2 Надійність резервованих обчислювальних систем .....	32
2.1 Методи резервування .....	32
2.2 Структурна схема та граф надійності .....	33

2.3 Надійність систем при навантаженому резерві .....	35
2.4 Мета роботи .....	38
2.5 Послідовність проведення роботи .....	38
2.6 Обробка результатів .....	39
2.7 Контрольні запитання .....	42
Перелік джерел посилання .....	44

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Мета виконання робіт – придбання та закріплення теоретичних знань з курсу “Надійність комп’ютерних систем”, набуття практичних навичок, оцінювання і розрахунку основних показників надійності приладів обчислювальних машин і систем, а також засвоєння засобів, спрямованих на збільшення часу їх відмовостійкої роботи. Курс проведення робіт повинен допомогти:

- засвоїти специфіку та актуальність науки про надійність обчислювальних приладів, систем та мереж;
- дослідити основні властивості і характеристики показників надійності не відновлювальних та відновлювальних приладів без резервування, простих та складних структур, систем та мереж;
- опанувати методику розрахунку основних показників надійності із застосуванням математичних моделей надійності;
- навчитися розробляти практичні структурні схеми надійності складних резервованих систем і перетворювати їх до простого розрахункового вигляду;
- набути практичні навички побудови орієнтованих графів надійності складних ОС і мереж та розрахунку нижнього та верхнього значень показників імовірності безвідмовної роботи методом мінімальних шляхів та мінімальних перерізів;
- навчитися практичним розрахункам показників надійності складних ОС на основі математичного апарату марківських процесів та систем масового обслуговування з використанням графа переходів між станами та диференційних рівнянь Колмогорова для стаціонарних режимів;
- опанувати методику розрахунку показників програмного забезпечення на ранніх етапах роботи виконується на основі статистичних даних, отриманих при аналізі прогнозування очікуваного числа помилок в програмі;
- засвоїти методику розрахунку основних показників надійності програмного забезпечення на ранніх етапах розробки на основі використання моделі Шумана.

Під час виконання завдань, студент зобов’язаний:

- знати зміст роботи та вивчити методику проведення розрахунків щодо основних показників надійності приладів та систем;
- повторити теоретичні положення відповідних розділів курсу

“Надійність комп’ютерних систем” та цього посібника;

- виконати завдання роботи, провести розрахунки основних показників надійності за відповідною методикою, накреслити необхідні таблиці експериментальних та статистичних даних, а також графіків з даних, які були отримані під час проведення розрахунків, зробити узагальнення і висновки за результатами роботи;

- здати викладачу підготовлений та охайно оформлений звіт виконання роботи.

Підготовка до роботи.

Для виконання лабораторної роботи студент повинен:

- використовуючи конспект лекцій та рекомендовану літературу, вивчити теоретичні питання даної теми;

- вивчити розділ цього посібника по даній темі;

- підготувати звіт із зазначенням на титульній сторінці назви дисципліни, номера та назви роботи, групи, кафедри, П.І.Б. студента та його підпис, дата здачі звіту, П.І.Б. викладача який прийняв роботу;

- вивчити контрольні запитання по даній роботі та дати відповіді на них.

Обладнання, прилади, матеріали.

Лабораторна робота виконується на обладнаному робочому місці. Для складання таблиць переліку елементів пристрою, для якого виконується розрахунок показників надійності, використовувати плати, або інші вузли підсистем обчислювальної (електронної) техніки, а також їх принципів електричні схеми. Дозволяється виконувати розрахунок показників надійності для приладів вибраних з інших підсистем, або джерел технічної документації (літератури), із середньою мірою складності. Для розрахунку показників надійності програмного забезпечення використовується код програми середньої складності, написаної на довільній мові програмування.

Заходи безпеки під час виконання робіт:

- при виконанні робіт треба дотримуватися правил, які установлені з техніки безпеки.

- після закінчення роботи прилади відключити від мережі живлення.

- навести порядок на робочому місці.

- зібрати плати, вузли, схеми використані під час роботи і здати їх викладачу.

## **1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

### **РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ ПРИЛАДІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ**

#### **1.1 Основні показники надійності невідновлювальних приладів**

Обчислювальні прилади поділяють на відновлювальні та невідновлювальні після відказу (наприклад, обчислювальна система керування безпілотним космічним об'єктом є невідновлювальна). Крім того, прилади ОТ відрізняються вимогами щодо надійності, умовами експлуатації та інше. Тому на практиці використовують різні показники надійності.

Взагалі, час до відмови, час між відмовами, час відновлювання та інше є випадкові величини. Тому, усі показники надійності, як для невідновлювальних, так і відновлювальних приладів, є імовірнісними.

Вихідними даними щодо кількісного визначення параметрів надійності є розподіл імовірності відмов у часі. Для оцінки цього розподілу якась кількість виробів експлуатується тривалий час, або проводять спеціальні випробування, доки усі прилади не відмовлять. Час відмови кожного виробу фіксується. Якщо на початок випробувань усі 100 відсотків виробів працюватимуть, то при якомусь часі ( $t \rightarrow \infty$ ) вони обов'язково вийдуть із ладу - відмовлять. Нормована крива, побудована на основі великого числа вимірів часу відмов, характеризує щільність імовірності відмов у часі  $f(t)$ . За допомогою щільності імовірності відмов у часі  $f(t)$  знаходять інші показники надійності приладів ОТ.

##### **1.1.1 Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$**

Імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  - імовірність того, що пристрій не відмовить в роботі до наперед заданого часу напрацювання на відмову  $t$  ( $t$  надають в годинах, часі за календарем, циклах, тощо).

Імовірність безвідмовної роботи має такі властивості:

- імовірність безвідмовної роботи при часі напрацюванні  $t=0$  буде  $P(0)=1$ , тобто, в першу мить роботи при експлуатації прилад, або система, будуть працездатними на 100 відсотків;

- імовірність безвідмовної роботи при часі напрацювання  $t=\infty$  буде  $P(\infty)=0$ , тобто, немає вічних виробів;

- похідна імовірності безвідмовної роботи від часу буде завжди менше нуля  $dP(t)/dt < 0$ , тобто, технічні характеристики приладів при експлуатації тільки старіють та погіршуються.

Під час проведення виробничих випробувань,  $P(t)$  визначається як

$$P(t) = N(t)/N_0, \quad (1.1)$$

де  $N(t) = N_0 - n$  - кількість виробів, які не відмовили при випробуваннях впродовж заданого часу;

$N_0$  - кількість виробів на початок випробувань;

$n$  - кількість виробів, які відмовили при випробуваннях впродовж зазначеного часу.

В технічних умовах (ТУ) на прилади, або паспорті на окремі радіоелементи, зазвичай приводять значення  $P(t)$  як показник надійності для часу  $t$ , вибраного з нормованого ряду, розрахованого за результатами виробничих випробувань (100, 500, 1000, 2000, 5000, 10000), або за формулами з використанням математичних моделей надійності (ММН) та інше.

Дослідження показали, що для несподіваних відмов найбільш справедливим є експоненціальний закон розподілу імовірності безвідмовної роботи.

Кількісно надійність визначається як імовірність того, що пристрій (система) продовжить справно працювати впродовж зазначеного часу  $t$  та може бути розрахованою за допомогою рівняння експоненціальної математичної моделі:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.2)$$

де  $\lambda$ -показник інтенсивності відмов.

Графічне представлення залежності імовірності надійної роботи від часу, приведеного до одиниць МТТФ (середнього часу напрацювання на відмову) наведено на рисунку 1.1.

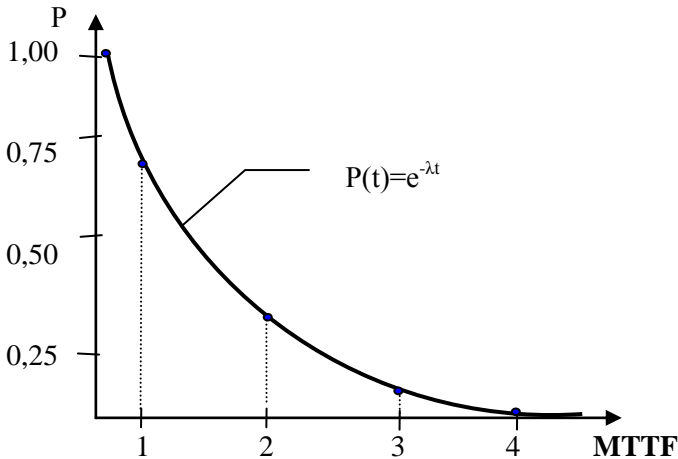


Рисунок 1.1 – Імовірність безвідмовної роботи в залежності від середнього часу напрацювання на відказ

### 1.1.2 Імовірність відмови $Q(t)$

Імовірність відмови  $Q(t)$  - імовірність того, що час до відмови випадково буде менше заданого часу напрацювання.  $Q(t)$  є доповненням імовірності безвідмовної роботи до 1:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (1.3)$$

Крім того, імовірність відмови виробів співпадає і дорівнює значенню функції розподілення часу напрацювання до відмову  $F(t)$ .

Під час проведення виробничих випробувань  $Q(t)$  визначається як

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - N(t)/N_0, \quad (1.4)$$

У загальному випадку, функція розподілення часу напрацювання до відмови є інтегральною:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.5)$$

де  $f(t)$ - функція щільності розподілення часу відмов.  
Тоді:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (1.6)$$

### 1.1.3 Середнє напрацювання часу на відмову

Середнє напрацювання часу на відмову  $T_{cp}$  визначається як математичне сподівання часу  $t$  до відмови:

$$T_{cp} = M_t = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot Q(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot (1 - P(t)) dt. \quad (1.7)$$

Середнє напрацювання часу на відмову  $T_{cp}$  можна оцінити статистично за формулою:

$$T_{cp} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (1.8)$$

де  $t_i$  – час до відмови  $i$ -го зразку при випробуваннях.

Але ця оцінка використовується тільки тоді, коли експеримент проводився до відмови усіх приладів.

### 1.1.4 Інтенсивність відмов

Інтенсивність відмов -  $\lambda_i$  визначає інтенсивність процесів виникнення відмов. Параметр  $\lambda_i$ , який має розмірність числа відмов за одиницю часу, звичайно приводять як параметр надійності  $i$ -тих радіоелементів (РЕ), який підприємство - виробник визначає на основі проведення експериментальних випробувань та указує в технічних умовах (ТУ), або в технічному паспорті (ТП) на РЕ. Виробник, який визначає параметр  $\lambda$ , проводить також статистичні дослідження поведінки РЕ, та несе відповідальність за цей показник.

На основі цих показників знаходять параметр  $\lambda_{np}$  приладів, або  $\lambda_c$  системи, вважаючи, що усі РЕ підключені послідовно, а відмова

одного РЕ приведе до відмови пристрою чи системи:

$$\lambda_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i, \quad (1.9)$$

де  $N$  – загальне число РЕ  $i$ -тої групи;

$n$  - загальне число  $i$ -тих груп РЕ.

Для елементів, приладів та систем ОТ інтенсивність відмов  $\lambda$  можна оцінити і статистично, по результатам випробувань, як відношення числа виробів, у яких була зафіксована відмідова за час випробувань, до середнього числа виробів, які працювали спочатку та продовжують справно працювати далі.

$$\Lambda_{cm} = \frac{n(\Delta t)}{0,5} \cdot (N_0 + N(\Delta t)) \quad (1.10)$$

де  $n(\Delta t)$  - число відмов РЕ, або приладів в інтервалі часу  $t$ ;

$N_0$ -загальне число справних РЕ на початок інтервалу часу  $t$ ;

$N(\Delta t)$  - загальне число справних РЕ на кінець інтервалу часу  $t$ .

Але кількісне визначення надійності РЕ потребує великих витрат часу та коштів щодо одержання та обробки результатів випробувань, статистичних даних та урахування технологій виробництва.

Взагалі, в теорії надійності справедливе таке рівняння:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (1.11)$$

Досвід показав, що для несподіваних відмов справедливий експоненціальний закон розподілу імовірності безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.12)$$

Тоді, враховуючи, що щільність імовірності відмов зв'язана із інтенсивністю відмов рівнянням:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1.13)$$

Середнє напрацювання на відмову  $T_{cp}$  можна визначити як:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.14)$$

Під час роботи в період експлуатації, тобто поміж процесів доводки приладів та до початку інтенсивного фізичного старіння, інтенсивність відмов  $\lambda$  **величина відносно постійна і дорівнює середній інтенсивності відмов одиницю часу**

$$\lambda \approx \lambda_{\text{ср}} = 1/T_{\text{ср}}. \quad (1.15)$$

Звідси можливе ще одне визначення середнього напрацювання на відмову

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda_{\text{ср}} = \text{MTTF}. \quad (1.16)$$

де MTTF-середній час напрацювання на відмову (Mean Time To Failure), або між відмовами MTBF (Mean Time Between Failures) за міжнародними стандартами.

Існує цілий ряд іноземних стандартів визначення MTTF, наприклад, перетворювач напруги серії BXA30 (Computer Products) має такі значення:

- за стандартом BELLCORE TR-NWT-332(США)-750.000 годин;
  - за стандартом HRD4(Англія)-250.000 годин.
- Вони значно відрізняються своїми вимогами.

Прийняті інтенсивності відмов деяких РЕ не завжди відповідають реальним значенням. Доскональна технологія та спеціальні методи відбракування, наприклад ІС, дозволяють довести цей показник до  $\lambda = 10^{-8} \div 10^{-9}$  1/год., але користуються не експериментальними, а розрахунковими параметрами  $\lambda = 10^{-7}$  1/год.

Для більшості РЕ, приладів та систем КТ залежність інтенсивності відмов  $\lambda$  від часу має вигляд кривої рисунка 1.2.

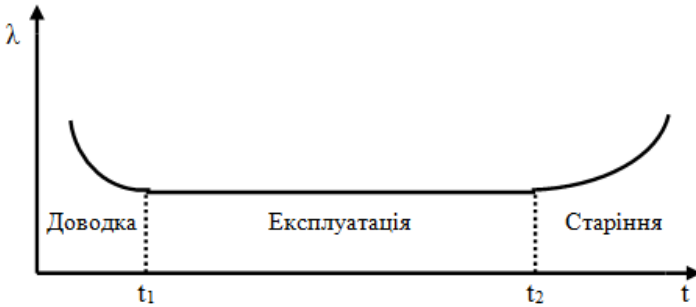


Рисунок 1.2 - Залежність інтенсивності відмов  $\lambda$  від часу

**Інтенсивність відмов називають  $\lambda$ -характеристикою, або кривою надійності.** Як видно із рисунка 1.2, увесь ресурс роботи РЕ, приладів або систем розподіляють на три періоди.

Період доводки ( $0-t_1$ ) — це етапи регулювання з електричними тренуваннями та прийнятно-здавальними випробуваннями. В цей період виходять з ладу всі РЕ з малим запасом надійності, тобто які мають дефекти. Другий період ( $t_1-t_2$ ) — це етапи нормальної експлуатації зі зниженим рівнем та відносно постійною інтенсивністю відмов. Тут відмови, в основному, носять несподіваний характер, але наприкінці відмови поступово зростають через погіршення технічних характеристик (старіння РЕ). Третій період (після  $t_2$ ) — це етап інтенсивного старіння елементів та зносу механіки.

### 1.1.5 Частота відмов

Частота відмов  $\psi(t)$  - відношення числа приладів, які відмовили,  $n(t)$  в одиницю часу  $\Delta t$  до числа виробів  $N$ , які беруть участь у випробуваннях:

$$\psi(t) = n(t) / N \Delta t. \quad (1.17)$$

Спираючись на значення частоти відмов розраховують загальне число запасних приладів:

$$N_{\text{зап}} = N \Delta t \psi(t) \quad (1.18)$$

Показник частоти відмов можна використовувати для оцінки надійності тих виробів  $N$ , які після відмови не відновлюються, при цьому, їх число  $N=N_0-n(t)$  під час випробувань  $\Delta t$  зменшується за рахунок виходу із ладу. Тому частота відмов  $\psi(t)$  у цьому випадку відображає **щільність розподілу часу напрацювання на відмову**

$$\psi(t)=f(t)=\lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.19)$$

### 1.1.6 Середньоквадратична похибка імовірності безвідмовної роботи

При розрахунках статистичної оцінки імовірності безвідмовної роботи  $P_{ст}$  (формула 1.1), за результатами випробувань, часто оцінюють середньоквадратичну похибку імовірності безвідмовної роботи  $\sigma_p$ , яку визначають як:

$$\sigma_p = \sqrt{P(1-P)/N_0} \quad (1.20)$$

де  $P$ -значення імовірності безвідмовної роботи для зазначеного часу.

Як бачимо, для забезпечення малої похибки  $\sigma_p$  при розрахунках  $P_{ст}(t)$  необхідно провести експеримент випробувань з великою кількістю виробів  $N_0$ .

### 1.1.7 Середньоквадратичне відхилення часу напрацювання на відмову

Середньоквадратичне відхилення часу напрацювання на відмову  $\sigma_T$  (квадрат  $\sigma_T$  називають дисперсією). Дисперсія  $D_T$  характеризує величину відхилення часу напрацювання на відмову  $t$  відносно його середнього значення  $T_{cp}$ .

$$\sigma_T^2 = D_T = \int_0^{\infty} (t - T_{cp})^2 f(t) dt. \quad (1.21)$$

Підставивши значення  $T_{cp}$  із (1.16) та значення функції щільності розподілення часу відмов  $f(t)$  із (1.13), одержимо:

$$\sigma_T^2 = D_T = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\lambda}\right)^2 \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt. \quad (1.22)$$

Цей вираз після інтегрування дає значення:

$$\sigma_T^2 = D_T = \frac{1}{\lambda}^2, \quad (1.23)$$

а середньоквадратичне відхилення часу напрацювання на відмову:

$$\sigma_T = \sqrt{D_T} = \frac{1}{\lambda} = MTTF. \quad (1.24)$$

Показник  $\sigma_T$  можна також оцінити статистично за формулою:

$$\sigma_T^2 = 1/N_0 \sum_{i=1}^N (t_i - T_{cp})^2, \quad (1.25)$$

де  $t_i$  – час до відмови  $i$ -го зразку виробу.

Однак, ця оцінка справедлива тільки тоді, коли експеримент випробувань проводився до відмови усіх зразків.

При сучасних надійних výroбах це потребує великих витрат, тому, приходиться екстраполювати експериментальну залежність (1.1) для знаходження інших показників надійності.

## 1.2 Показники надійності відновлювальних приладів

Показники надійності відновлювальних приладів тісно пов'язані із пуасонівським потоком випадкових подій, коли виконуються умови стаціонарності, ординарності та відсутності післядії. Крім приведених раніше показників надійності, які діють і для відновлювальних приладів, розглянемо ще деякі.

### 1.2.1 Середня частота відмов

Середня частота відмов  $\omega(t)$  - визначає питому кількість відмов  $n(t)$  відносно одиниці часу інтервалу  $\Delta t$  на один зразок апаратури  $N_0$ . Статистично оцінюється як число відмов віднесених до числа зразків на початок випробувань та інтервалу часу:

$$\omega(t) = n(t)/N_0 \Delta t, \quad (1.26)$$

Якщо, при визначенні частоти відмов  $\psi(t)$  (1.17), РЕ або прилади ОТ не відновлюються, то при визначенні середньої частоти відмов

(іноді цей показник називають **потокм відмов**) вони завжди відновлюються до початкової кількості  $N_0$ . Тому кількість виробів випробувань завжди постійна. В період експлуатації, коли інтенсивність відмов  $\lambda(t) = \text{const}$ , то і потік відмов:

$$\omega(t) = \lambda(t) = \text{const}. \quad (1.27)$$

### 1.2.2 Час відновлювання (ремонтоздатність).

Час відновлювання (ремонтоздатність) – час знаходження та усунення відмов залежить від багатьох факторів і перш за все конструкції, схеми та кваліфікації персоналу обслуговування техніки. Зручніше за все використовувати, як показник, середній час відновлювання (ремонту) - MTTR (Mean Time To Repair) яке визначається як відношення загального часу усіх ремонтів до їх загальної кількості  $n$ :

$$\text{MTTR} = T_{\text{PEM}} = \sum_{i=1}^n t_i / n = 1/r, \quad (1.28)$$

де  $r$  - середня частота ремонту, тобто кількість відремонтованих РЕ (плат, приладів) в перерахунок на 1 годину.

### 1.2.3 Коефіцієнт готовності КГ

Цей показник надійності використовують для оцінки імовірності того, що в будь-яку мить часу  $t$  інформаційна система (обчислювальний центр, локальна мережа та інші) знаходиться в робочому стані (окрім запланованих профілактик). Статистично коефіцієнт готовності визначається як відношення числа працюючих приладів, наприклад, універсальних ЕОМ інформаційної системи  $N_{\text{пр}}(t)$  до загального їх числа приладів  $N_0$  в інформаційній системі:

$$K_{\Gamma} = N_{\text{пр}}(t) / N_0. \quad (1.29)$$

Незважаючи на те, що  $K_{\Gamma}$  по суті **дорівнює**  $P(t)$ , для великих інформаційних систем мову ведуть про показник  $K_{\Gamma}$ , а не про імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ .

### 1.2.4 Стаціонарний коефіцієнт готовності

Стаціонарний коефіцієнт готовності  $K_{Г.СТ.}$  визначається як відношення загального часу напрацювання до відмови (або між відмовами) пристрою, системи до цього ж часу та часу на його відновлення:

$$K_{Г.СТ.} = \sum t_{\text{нап.}} / (\sum t_{\text{нап.}} + \sum t_{\text{від.}}). \quad (1.30)$$

Показник стаціонарного коефіцієнту готовності використовують для оцінки великих інформаційних систем, де зневага часом відновлення не можлива.

### 1.2.5 Коефіцієнт оперативної готовності

Коефіцієнт оперативної готовності  $K_{Г.оп.}$  визначається імовірністю того, що об'єкт системи буде в робочому стані в довільний момент часу (окрім запланованих профілактик) та розпочинаючи з цього моменту буде працювати безвідмовно потрібний час. Останнє має особисте значення при виконанні якогось важливого завдання.

## 1.3 Математична модель надійності

Один із засобів опису залежності надійності виробів від часу є математична модель надійності (ММН). Найпростіші ММН, у вигляді емпіричних формул, мають назву статистичних моделей розподілу надійності. Розглянемо найбільш поширені з них.

### 1.3.1 Експоненційна модель

Експоненційна модель імовірності безвідмовної роботи визначалася формулою (1.2) як показник надійності, який визначає імовірність того, що пристрій (РЕ, система) не відмовить до моменту наперед визначеного часу  $t$ .

$$P_E(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.31)$$

де  $\lambda$  – показник інтенсивності відказів;

$t$  – час, на який визначається або прогнозується показник імовірності безвідмовної роботи;

$e$  – основа натурального логарифму, константа,  $e = 2,718281$ .

Графік залежності імовірності безвідмовної роботи від часу наведений раніше на рисунку 1.1.

Відповідно до цього закону, імовірність відмов при справній роботі приладів, які мають інтенсивність відмов  $\lambda$ , зменшується із збільшенням часу  $t$  згідно з експоненціальною кривою.

Напрацювання до відмови при експонентній моделі визначається за середнім часом  $T_{cp}$ ,

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda = MTTF \quad (1.32)$$

Експонентна модель використовується в тих випадках, коли інтенсивність відмов має постійне значення. Ця умова для радіоелектронних приладів приблизно виконується в період експлуатації.

Взагалі, експонента  $e^{-\lambda t}$  відноситься до класу показових функцій, які мають властивість  $e^x e^z = e^{x+z}$  при будь-яких значеннях  $x$  та  $z$ . Ця властивість дозволяє визначати загальну інтенсивність відмови пристрою  $\lambda_{np}$ , який складається із декількох блоків, простим складанням їх показників

$\lambda_{np} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ , якщо потоки відказів можна розглядати як пуасонівські.

Відзначимо ще одну вагому властивість показової функції, яку використовують в теорії надійності. Імовірність безвідмовної роботи  $P_E(t, t+\tau)$  в деякому інтервалі  $(t, t+\tau)$  не залежить від попереднього часу напрацювання  $t$ , а визначається тільки інтенсивністю відмов та довжиною інтервалу  $\tau$ . Тобто, майбутня поведінка, в розумінні безвідмовної роботи радіоелемента, не залежить від минулого, якщо до часу  $t$  не було раптових відмов. Дійсно, відповідно до формули повної імовірності [2] маємо

$$P_E(t, t+\tau) = P_E(t+\tau)/P_E(t) = e^{-\lambda(t+\tau)}/e^{-\lambda t} = e^{-\lambda \tau}$$

Показовий закон в теорії надійності, як і пуасонівський потік відмов, займають важливе положення. Так, операція об'єднання декількох пуасонівських потоків дає в результаті теж пуасонівський потік. Це дозволяє оцінювати інтенсивність відмов складних приладів складанням інтенсивності відмов їх елементів, якщо усі відмови незалеж-

ні.

Експоненційну модель рекомендовано використовувати при виконанні розрахунків надійності у випадку відсутності інших вихідних даних для розрахунку, крім інтенсивності відмов.

### 1.3.2 Модель Вейбула

Модель Вейбула знайшла широке практичне використання так, як в залежності від значень параметра моделі, характер розподілу змінюється в широких межах. Імовірність безвідмовної роботи згідно з [1] дорівнює

$$P_B(t) = \exp(-\lambda t^\beta), \quad (1.33)$$

де  $\beta$  - параметри моделі.

Для електронних приладів зі спадаючою функцією інтенсивності відмов  $\beta$  має значення **0,2-0,4**. Для механічних приладів, які мають зростаючу функцію інтенсивності відмов  $\beta=1,2-1,6$ . Тобто дана модель враховує конструктивні особливості приладу чи системи, що аналізується.

При  $\beta=1$  модель Вейбула перетворюється в експоненціальну модель.

Вважають, що для електронних приладів модель Вейбула дає вищі значення показників імовірності безвідмовної роботи, особливо при значному часі напрацювання на відмову [4,10,12].

### 1.3.3 Модель Пуассона

Модель Пуассона визначає імовірність  $P(t,n)$  того, що на заданому інтервалі часу  $(t_1, t_2)$  випадково відбудеться рівно  $n$  відмов, якщо час між окремими відмовами розподілено за експоненційним законом із показником інтенсивності відмов  $\lambda$ .

$$P_{II}(t,n)=P\{X(t_2)-X(t_1)=n\}=(\lambda^n(t_2-t_1)^n/n!)\cdot e^{-\lambda(t_2-t_1)}, \quad (1.34)$$

де  $n$  – прогнозована кількість відмов,  $n=0,1,2,\dots$

Підставляючи будь-яке значення  $n$  в (1.35) ми визначаємо, з якою імовірністю в заданому інтервалі часу  $t_2-t_1$  відбудеться  $n$  відмов.

Модель Пуассона базується на випадковому процесі  $X(t)$  із незалежними прирощеннями  $X(t_2)-X(t_1)$  (де  $t_2 > t_1$ ), які мають розподілення Пуассона (1.35) і називаються пуасонівським процесом незалежних випадкових подій, якщо виконуються умови стаціонарності, ординарності та відсутності післядії (незалежність від попередніх подій).

#### 1.4 Розрахунок показників надійності нерезервованих приладів КС

Методи наближеного розрахунку показників надійності приладів комп'ютерних систем (КС) умовно можна розподілити на:

- розрахунок показників надійності приладів відносно раптових відмов радіоелементів;
- розрахунок показників надійності приладів відносно раптових відмов радіоелементів із врахуванням прогнозу їх старіння;
- розрахунок показників надійності приладів відносно раптових відмов радіоелементів із врахуванням допуску на їх технічні характеристики.

Розглянемо перший із них, як найбільш типовий для проектування. Він використовується для виявлення слабких місць при розробці пристрою.

Вихідними даними для розрахунків мають бути:

- принципова електрична схема із переліком найменування типів РЕ, їх ТУ (або технічних паспортів) та їх кількості в пристрої;
- умови роботи РЕ при експлуатації пристрою;
- значення інтенсивності відмов  $\lambda_i$  для кожного  $i$ -го типу РЕ.

**Примітка.** Якщо принципової електричної схеми немає, то можна користуватися розібраним до плат (блоків) пристроєм із умовою забезпечення доступу до кожного радіоелемента з метою визначення його типу та загальної кількості РЕ цього типу.

ПОТРІБНО ВИЗНАЧИТИ основні показники надійності нерезервованого, пристрою КТ такі, як:

- інтенсивність відмов РЕ—  $\lambda_i$ ;
- інтенсивність відмов плати пристрою -  $\lambda_{пл.}$ ;
- інтенсивність відмов плати пристрою із врахуванням умов роботи при експлуатації -  $\lambda_{пл.}^*$ ;
- середнє напрацювання часу на відмову  $T_{ср}$
- імовірність безвідмовної роботи -  $P(t)$ ;

- імовірність відмови -  $Q(t)$ ;
- середньоквадратичне відхилення часу напрацювання -  $\sigma_T$  (MTTF);
- середню частоту (потік) відмов при експлуатації  $\omega(t)$ ;
- час відновлювання (ремонтоздатність) пристрою -  $T_{\text{РЕМ}}$ ;
- визначити прогноз залежності імовірності безвідмовної роботи пристрою від часу (взяти чотири точки – 100 год., 1.000 год., 10.000 год., 100.000 год.) за допомогою математичних моделей надійності  $P_E(t)$ ,  $P_B(t)$ , порівняти їх графіки;
- визначити, за допомогою математичної моделі надійності Пуассона, з якою імовірністю  $P_n(t, n)$  на інтервалі часу 100-10000 годин можуть відбутися 0, або 1, або 2, або 3 відмови пристрою. Провести аналіз графіків функції.

При розрахунках показників надійності, щодо раптових відмов, вводяться такі припущення:

- відмови радіоелементів (компонентів) пристрою є раптовими;
- інтенсивність їх відмов має постійне значення в часі;
- відмова будь-якого РЕ, або групи РЕ призводить до відмови всього пристрою;
- потік відмов є пуасонівський (стаціонарність, ординарність, відсутність післядії).

#### 1.4.1 Порядок проведення розрахунків

1. На основі принципової електричної схеми будується структурна схема надійності. Так як пристрій не має ніякого резервування, то структурна схема надійності, на рівні РЕ, (плат, каскадів, блоків, тощо), являє собою їх послідовне включення. На основі “Переліку РЕ” принципової електричної схеми, визначається кількість радіоелементів  $N_i$  за їх типами на кожній платі пристрою.

2. Для кожного типу радіоелементу визначається із його технічних умов (ТУ), або технічного паспорту (ТП), або довідника (стандарту) значення показника інтенсивності відмов  $\lambda_i$ , та для отримання загального значення показника інтенсивності групи однакових елементів знайдені значення перемножуються на кількість радіоелементів групи  $N_i$  цього типу. Де  $i=1,2,3,...,m$  – кількість типів РЕ.

**Примітка.** Дозволяється, окрім ТУ, ТП, довідника, використовувати орієнтовні значення показників інтенсивності відмов радіоеле-

ментів поширеного вживання, а також пайок та рознімів, наведених в таблиці 1.1.

3. Визначається інтенсивність відмов вузлів (каскадів) найнижчої конструктивної ієрархії, наприклад, для плати, за формулою

$$\lambda_{\text{пл}} = \sum N_i \lambda_i$$

Якщо пристрій складається із декількох плат, тоді частоту відмов пристрою  $\Lambda_{\text{пр.}}$  знаходять як суму

$$\Lambda_{\text{пр.}} = \sum \lambda_{\text{пл.і.}}$$

де  $i$  – кількість плат пристрою,  $i=1,2,...,i$ .

Приведена вище формула означає, що частота відмов пристрою (системи) визначається як сума частот відмов їх радіоелементів.

4. Визначаються із технічного завдання (ТЗ), або ТУ на пристрій умови його роботи при експлуатації. Для врахування впливу дії оточуючих факторів середовища, вибирається із таблиці 1.2 значення коефіцієнту **K** умов роботи пристрою (системи, тощо) при експлуатації. Взагалі, для визначення коефіцієнту **K** умов роботи пристрою, необхідно користуватися стандартом.

Тоді, інтенсивність відвідмови пристрою, із врахуванням оточуючих факторів середовища, буде

$$\Lambda_{\text{пр.}}^* = K \cdot \Lambda_{\text{пр.}}$$

де **K** – емпіричний коефіцієнт впливу середовища, визначений на підставі експериментів, щодо зміни кліматичних, теплових, морозних, транспортних, ударних, тиску та багато інших факторів умов роботи.

5. Знаючи інтенсивність відмов пристрою із врахуванням оточуючих факторів середовища  $\Lambda_{\text{пр.}}^*$ , визначаються всі інші показники надійності, перелічені в підпункті ПОТРІБНО ВИЗНАЧИТИ за формулами, що приведені раніше.

Таблиця 1.1- Інтенсивність відмов РЕ

Назва радіоелемента	$\lambda \cdot 10^{-7}$
<b>1 Конденсатори</b>	
Конденсатор керамічний	2
Конденсатор високовольтний	30
Конденсатор слюдяний	1
Конденсатор поліестровий	30
Конденсатор фольга - папір	30
Конденсатор стірофлексний	20
Конденсатор електролітний низьковольт.	50
Конденсатор танталовий	5
Конденсатор фільтру сіті	100
Конденсатор перемінний	100
Конденсатор підстроєчний	30
<b>2 Діоди</b>	
Діоди кристалові	10
Діоди резонансні	9
Діоди Schottki	20
Діоди Zener	50
Діоди кременеві низьковольтні	7
Діоди високовольтні	200
Діоди керуємі	70
<b>3 Транзистори</b>	
Транзистор Si малої потужності.	12
Транзистор Si високого напруження	20
Транзистор Si високої потужності	50
Транзистор Si Darlington	70
<b>4 Резистори</b>	
Резистор металізований -5%,10%,20%	7
Резистор карбоновий -5%,10%,20%	10
Резистор дротяний до 1 вата	5
Резистор дротяний вище 1вата	10
Резистор композиційний -5%,10%,20%	5
Потенціометр	200

## Продовження таблиці 1.1

Назва радіоелемента	$\lambda \cdot 10^{-7}$
5 Інтегральні схеми СНД	
Типу ТТЛ, ТТЛШ	
K101КТxx, K122xxxx, K133xxxx	70
K155xxxx, K157xxxx, K500xxxx	60
K555xxxx, K580xxxx, K588xxxx	50
K1500xxx, K1533xxx, K1858xxx	50
Типу ЕСП, K1500СП166	50
Типу КМОП, БІМОП	80
Типу ЕСЛК1500, МС10000	40
6 Інтегральні схеми СДЗ	
Типу 74xx, 74LSxx, SSI, MSI	30
Типу Complex	60
Типу 74Sxx, 74Asxx	70
Типу 74ALSxx	50
Типу 74Cxx, 74HCxx, 74HCTxx	50
Типу Controllers, Timers	100
Типу One shots 74LS221	50
Типу One shots VLSIs, CPUs	170
Типу Line Driver & Receiver	110
Типу Linear Devices	130
Типу Memories RAM	150
Типу Memories SRAMS	160
Типу Memories DRAMS	180
6 Інші покупні вироби, тощо	
Трансформатор	30
Реле	100
Рознім (на один контакт)	1
Вимикач (на один контакт)	3
Лампочка	5
Вентилятор	10
Електродвигун	15
Пайка (на один контакт)	1
Пристрій друку	200

Примітка. При визначенні  $\lambda$ , треба показник таблиці 1.1 множити на  $10^{-7}$ .

Таблиця 1.2- Коефіцієнт умови роботи

Умови експлуатації	Коефіцієнт К
Лабораторні	1
Польові	2
На автотранспорті	2,5
На поїзді	3
Борт корабля	4
Високогірні польові	5
Борт літака	6
Борт ракети	8
Космічні об'єкти	9

#### 1.4.2 Приклад розрахунку показників надійності нерезервованих приладів ОТ

Розрахувати основні показники надійності плати, яка має перелік радіоелементів, наведений в таблиці 1.3. Умови експлуатації – лабораторні. Резервування відсутнє.

Таблиця 1.3- Приклад розрахунку інтенсивності відказів плати

Назва групи РЕ	Група $N_i$ , шт.	$\lambda_i$ , 1/год	$\lambda_i \cdot N_i$ , 1/год	$\lambda_{пл.} = \sum \lambda_i \cdot N_i$ , 1/год	$\Lambda_{пл.}^* = K \cdot \Lambda_{пл.}$ , 1/год
1.ІС типу К588xxx	24	50	1200	$\sum \lambda_i \cdot N_i = 8414$ $\lambda_{пл.} = 8414$	При $K=1$ $\Lambda_{пл.}^* = 1 \cdot \Lambda_{пл.} = 8414/10^7$
2.ІС типу К133xxx	65	70	4550		
3.Діоди кременеві	32	7	224		
4.Конденсатори електролітні	15	50	750		
5.Резистори металізовані 10%	70	7	490		
6.Високочастотний дросель(до 1-го Вт)	10	5	50		
7.Рознім 75×2	150	1/1	150		
8.Пайка	1000	1/1	1000		

Знаючи показник інтенсивності відвідмови плати, (таблиця 1.3)  
 $\Lambda_{\text{пл}}^* = 0,0008414$ , визначимо інші показники надійності.

1. Середнє напрацювання часу на відвідмову (формулу 1.15):  
 $T_{\text{cp}} = 1/\lambda_{\text{cp}} = \text{MTTF}$ .

$$T_{\text{cp}} = 1/0,0008414 = 1188,4954 \approx 1188,5 \text{ год.}$$

2. Імовірність безвідмовної роботи на час середнього напрацювання на відмову (формула 1.2):  $P_E(T_{\text{cp}}) = e^{-\lambda T_{\text{cp}}}$ . Підставивши значення, одержимо:

$$P_E(T_{\text{cp}}) = e^{-0,0008414 \cdot 1188,50} = e^{-1,0000039} = 2,7182^{-1,0} = 1/2,7182 = 0,37$$

3. Імовірність відмови (формула 1.3) на час напрацювання -  
 $Q(t) = 1 - P(t)$ . Підставивши значення із пункту 2, одержимо:

$$Q(t) = 1 - 0,37 = 0,63.$$

4. Середньоквадратичне відхилення часу напрацювання на відмову (формула 1.24)  $\sigma_T = \sqrt{D_T} = 1/\lambda = \text{MTTF}$ . Підставивши значення, одержимо:

$$\sigma_T = 1/\lambda = 1/0,0008414 = 1188,4954 = 1188,5 \text{ год.}$$

5. Потік відмов при експлуатації (1.27)

$$\omega(t) = \lambda(t) = 0,0008414.$$

6. Час відновлювання (ремонтотздатність) плати для відновлювальних систем (див. 1.28)  $MTTR = T_{\text{рем}} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} = \frac{1}{r}$ . При середній частоті ремонту на рівні плат (заміна на аналогічну)  $r=4$ ,

$$T_{\text{рем.}} = 1/4 \text{ год.} = 15 \text{ хвилин.}$$

7. Спрогнозувати залежність імовірності безвідмовної роботи плати від часу (взяти такі точки –100 год., 1000 год., 10.000 год., 100.000 год.) за допомогою математичних моделей надійності  $P_E(t)$ ,  $P_B(t)$ , порівняти їх графіки.

Проведемо розрахунки з використанням експоненціальної моделі:

$$P_E(100) = e^{-\lambda t} = e^{-8414 \cdot 100/10.000.000} = e^{-0,08414} = 0,92.$$

$$P_E(1.000) = e^{-\lambda t} = e^{-8414 \cdot 1.000/10.000.000} = e^{-0,8414} = 0,43.$$

$$P_E(10.000) = e^{-\lambda t} = e^{-8414 \cdot 10.000/10.000.000} = e^{-8,414} = 0,01$$

$$P_E(100.000) = e^{-\lambda t} = e^{-8414 \cdot 100.000/10.000.000} = e^{-84,14} = 0,00011$$

$$P_E(1.000.000) = e^{-\lambda t} = e^{-8414 \cdot 1.000.000/10.000.000} = e^{-841,4} = 0,000001$$

Виконаємо розрахунки з використанням моделі Вейбула

$$P_B(t) = \exp(-\lambda t^\beta).$$

Згідно із [1,3],  $\beta$  для електронних приладів має значення 0,5.

Тоді:

$$P_B(100, 0.5) = \exp(-8414 \cdot 100^{0.5} / 10.000.000) = 0,9916$$

$$P_B(1.000, 0.5) = \exp(-8414 \cdot 1.000^{0.5} / 10.000.000) = 0,9737$$

$$P_B(10.000, 0.5) = \exp(-8414 \cdot 10.000^{0.5} / 10.000.000) = 0,9193$$

$$P_B(100.000, 0.5) = \exp(-8414 \cdot 100.000^{0.5} / 10.000.000) = 0,7664$$

$$P_B(1.000.000, 0.5) = \exp(-8414 \cdot 1.000.000^{0.5} / 10.000.000) = 0,4311$$

Спрогнозуємо значення імовірності безвідмовної роботи системи при умові, що розглядається механічний прилад з аналогічними параметрами інтенсивності відмов. Для механічних приладів  $\beta$  має значення 1,5.

$$P_B(100, 1.5) = \exp(-8414 \cdot 100^{1.5} / 10.000.000) = 0,4311$$

$$P_B(1.000, 1.5) = \exp(-8414 \cdot 1.000^{1.5} / 10.000.000) = 0,01$$

$$P_B(10.000, 1.5) = \exp(-8414 \cdot 10.000^{1.5} / 10.000.000) = 0,001$$

$$P_B(100.000, 1.5) = \exp(-8414 \cdot 100.000^{1.5} / 10.000.000) = 0,0001$$

$$P_B(1.000.000, 1.5) = \exp(-8414 \cdot 1.000.000^{1.5} / 10.000.000) = 0,00001$$

На рисунку 1.3 представлені графіки імовірності безвідмовної роботи для експоненціальної моделі та моделі Вейбула відносно часу. З графіків видно, що показники надійності по моделі Вейбула значно вищі ніж показники експоненціальної моделі.

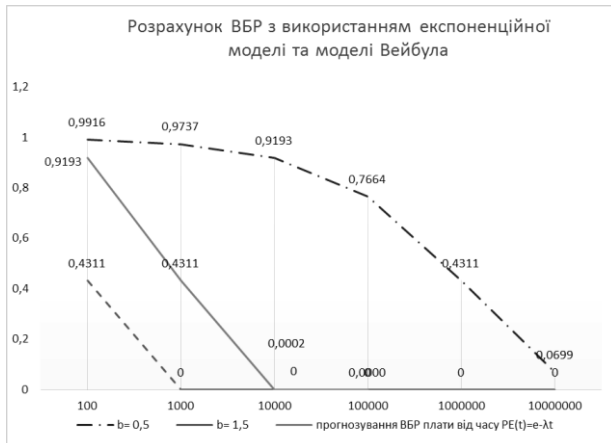


Рисунок 1.3 – Імовірність безвідмовної роботи

8. Визначити, за допомогою математичної моделі надійності Пуассона  $P_{\Pi}(t, n)$ , з якою імовірністю на інтервалах часу від 1000 до 1100 годин, від 1000 до 2000 годин, від 1000 до 11000 годин можуть відбутися 0, або 1, або 2, або 3 відмови пристрою.

Згідно із (1.35) маємо  $P_{\Pi}(t, n) = (\lambda^n (t_2 - t_1)^n / n!) \cdot e^{-\lambda(t_2 - t_1)}$ .

Проведемо розрахунки для  $n=0, 1, 2, 3$  при  $t = 100, 1.000, 10.000$ .

$$P_{\Pi}(100, 0) = (8414 / 10.000.000)^0 \cdot 100^0 / 0! \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = e^{-\lambda \cdot 100} = 0,92;$$

$$P_{\Pi}(100, 1) = (8414 / 10.000.000)^1 \cdot 100^1 / 1! \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,08414 \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,078;$$

$$P_{\Pi}(100, 2) = (8414 / 10.000.000)^2 \cdot 100^2 / 2! \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,0035 \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,0033;$$

$$P_{\Pi}(100, 3) = (8414 / 10.000.000)^3 \cdot 100^3 / 3! \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,000099 \cdot e^{-\lambda \cdot 100} = 0,000091;$$

$$P_{\Pi}(1.000, 0) = (8414 / 10.000.000)^0 \cdot 1000^0 / 0! \cdot e^{-\lambda \cdot 1.000} = e^{-\lambda \cdot 1.000} = 0,4311;$$

$$P_{\Pi}(1.000, 1) = (8414 / 10.000.000)^1 \cdot 1000^1 / 1! \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,08414 \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,3627;$$

$$P_{\Pi}(1.000, 2) = (8414 / 10.000.000)^2 \cdot 1000^2 / 2! \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,0035 \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,1526;$$

$$P_{\Pi}(1.000, 3) = (8414 / 10.000.000)^3 \cdot 1000^3 / 3! \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,000099 \cdot e^{-\lambda \cdot 1000} = 0,0428;$$

$$P_{\Pi}(10.000, 0) = (8414 / 10.000.000)^0 \cdot 10.000^0 / 0! \cdot e^{-\lambda \cdot 10.000} = e^{-\lambda \cdot 10.000} = 0,0002;$$

$$P_{\Pi}(10.000, 1) = (8414 / 10.000.000)^1 \cdot 10.000^1 / 1! \cdot e^{-\lambda \cdot 10.000} = 0,0019;$$

$$P_{\Pi}(10.000, 2) = (8414 / 10.000.000)^2 \cdot 10.000^2 / 2! \cdot e^{-\lambda \cdot 10.000} = 0,0079;$$

$$P_{\Pi}(10.000, 3) = (8414 / 10.000.000)^3 \cdot 10.000^3 / 3! \cdot e^{-\lambda \cdot 10.000} = 0,022.$$

На рисунку 1.4 представлені графіки імовірності виникнення відповідної кількості відмов у заданий проміжок часу, визначені за моделлю Пуассона. З рисунку видно, що зі збільшенням проміжку часу, що аналізується, імовірність виникнення нуля відмов зменшується, а імовірність виникнення  $n$  відмов збільшується.

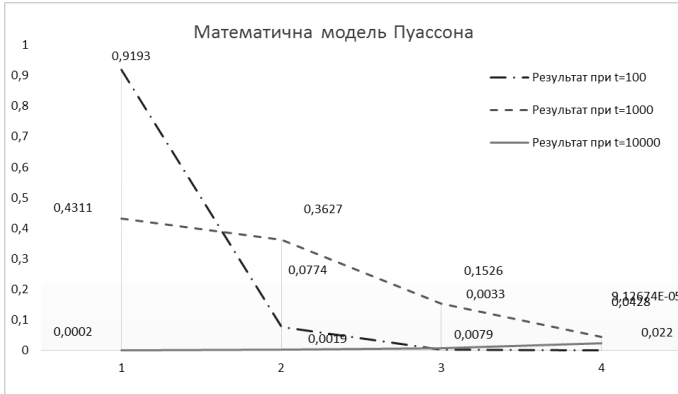


Рисунок 1.4 – Імовірність виникнення відмов

Аналіз розрахунків показує, що при  $n=0$  модель Пуассона перетворюється в модель експоненціального розподілу ймовірності безвідмовної роботи.

При розрахунках зручно користуватись таблицею 1.4 для значень  $e^x$ , яка наведена нижче.

Таблиця 1.4 - Значення  $e^{-x}$ 

X	$e^{-x}$	X	$e^{-x}$	X	$e^{-x}$	X	$e^{-x}$
0,00	1,00	14	86	0,60	0,54	60	20
0,01	0,99	15	86	65	52	70	18
02	98	16	85	0,70	0,49	80	16
03	97	17	84	75	47	90	14
04	96	18	83	0,80	0,44	2,00	0,13
05	95	19	82	85	42	10	12
06	94	0,20	0,81	0,90	0,40	20	11
07	93	25	77	95	38	30	10
08	92	0,30	0,74	1,00	0,36	40	09
09	91	35	70	10	33	50	08
0,10	0,90	0,40	0,67	20	30	60	07
11	89	45	63	30	27	70	06
12	88	0,50	0,60	40	24	80	06
13	87	55	57	50	22	2,90	0,05

## 1.5 Мета роботи

Мета роботи - засвоїти методику розрахунку основних показників надійності невідновлювальних нерезервованих приладів обчислювальної техніки для раптових відмов, дослідження властивостей прогнозування безвідмовної роботи за математичними моделями надійності: експоненціального розподілення, Пуассона, Вейбула.

## 1.6 Порядок проведення роботи

Одержавши (або обравши самостійно) плати (вузли), або електричні схеми пристрою, для якого проводиться розрахунок показників надійності, та ознайомившись з ними, студент визначає загальну кількість елементів за типами РЕ, складаючи для розрахунку таблицю типу таблиці 1.3.

**Примітка.** Якщо плати, вузли, електричні схеми відсутні, допускається використовувати дані таблиці 1.3, додаючи 10+ номер студента за журналом групи до кількості РЕ.

Використовуючи методику розділу I, виконати розрахунок усіх показників надійності за прикладом та умовами підрозділу 1.3 Умови експлуатації вибираються самостійно. Резервування та відновлення відсутні.

## 1.7 Обробка результатів

В звіті виконаної роботи привести основні теоретичні положення, розрахункові формули і розрахунки. Усі розрахунки звести до таблиці, побудувати графіки  $P(t)$ ,  $P(t,n)$ ,  $\lambda(t)$ . Зробити висновки про якість моделей прогнозування  $P(t)$ ,  $P(t,n)$ ,  $\lambda(t)$ , та інше, оформити звіт та, захистивши, здати викладачеві для заліку.

## 1.8 Контрольні запитання

1. Дати визначення та привести формули основних показників надійності.

2. Чим визначається вибір показників надійності для оцінки приладів.

3. Дати аналіз графіків основних показників надійності  $P_E(t)$ ,  $P_B(t)$ ,  $P_{II}(t,n)$ ,  $Q_E(t)$ ,  $Q_B(t)$ ,  $\lambda_E(t)$  обчислювальних приладів.
4. Чим відрізняється показник «напрацювання до відказу» від MTTF, або MTBF.
5. Як враховується вплив зовнішнього середовища при експлуатації приладів на їх показники надійності.
6. В яких технічних документах визначають показники надійності на РЕ, на пристрій на систему. Назвати ці показники.
7. Як практично визначити основні показники надійності для приладів за результатами випробувань.
8. Як практично визначити основні показники надійності для приладів за результатами статистики відказів.
9. Як практично визначити основні показники надійності для приладів за їх принциповою електричною схемою.
10. На яких етапах розробки приладів визначаються показники надійності.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

#### 2.1 Методи резервування

В окремих випадках, коли потрібно підвищити показники надійності РЕ, вузлів, приладів тощо, в обчислювальних системах включають паралельно основному обладнанню таке саме резервне обладнання, розташування якого передбачено в конструкції.

Взагалі, цей спосіб дозволяє конструювати із ненадійних елементів надійну апаратуру [7], так як, при відмові основних елементів, роботу продовжують резервні. Різноманітність методів та способів включення резерву представлена на рисунку 2.1.

Якщо кількість резервних елементів  $s$  менша за основну  $w$ , то має місце резервування із дробовою кратністю та навпаки, якщо кількість резервних елементів більша за основну в  $k$  разів, то має місце ціле  $k$ -кратне резервування. Де  $k=0,1,2,3,..$

Загальне резервування, коли резервують увесь елемент (пристрій, блок, плату, РЕ, інше) як і дробове, коли резервують окремі елементи (вузли, блоки, плати) пристрою, або комбіноване, може бути із постійним включенням, або із включенням при заміщенні елемента що відмовив.

При цьому резервні елементи знаходяться в одному з режимів:

- навантажений (гарячий);
- ненавантажений (холодний), коли резерв не підключений до джерел напруги;
- полегшений (теплий), коли резерв підключений до джерел напруги, але відключений від навантаження.

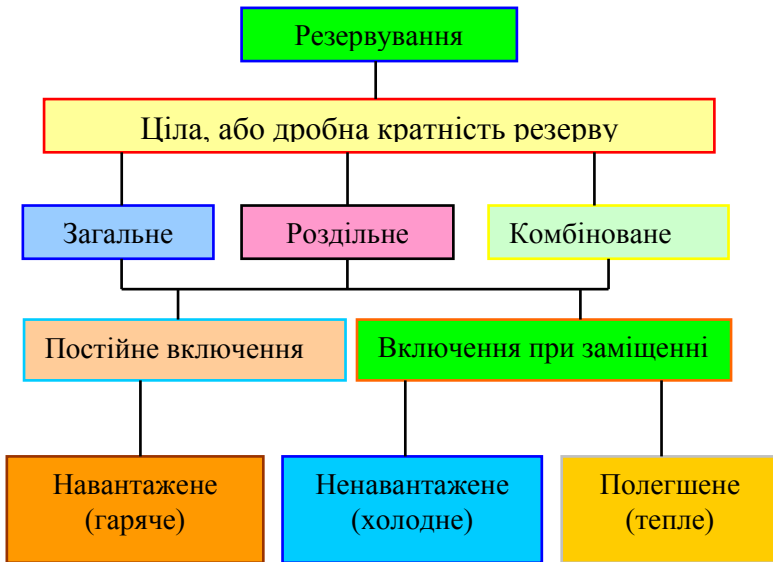
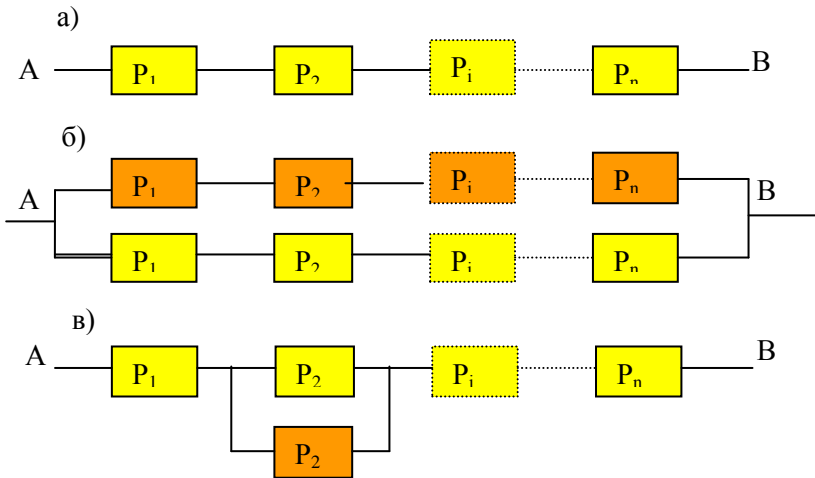


Рисунок 2.1 - Класифікація типів резервування

## 2.2 Структурна схема та граф надійності

Резервована, або нерезервована, система може бути представлена у вигляді структурної схеми надійності, або зв'язаного графа надійності. Структурна схема надійності для нерезервованих систем виглядає як послідовно поєднані прямокутники, де кожен з них визначає функціонально-закінчений елемент (РЕ, або вузол, або плату, або пристрій, та інше). При цьому, сама їх послідовність не має значення.

Структурна схема надійності для резервованих систем виглядає як послідовно поєднані прямокутники, до яких паралельно приєднаний резерв, якщо він є. Приклади структурних схем надійності наведені на рисунку 2.2. Де А – вхід системи, В – вихід.



а) нерезервована, б) загальний резерв, в) розділений резерв.  
Рисунок 2.2-Структурна схема надійності систем

У зв'язаному графі надійності вершини відповідають сполученням між підсистемами, а дуги - підсистемам. При цьому, відмові підсистеми відповідає обрив  $i$ -го ребра графа, а відмові системи - втрата зв'язку між двома вершинами графа А та В.

Приклад графа надійності показаний на рисунку 2.3.

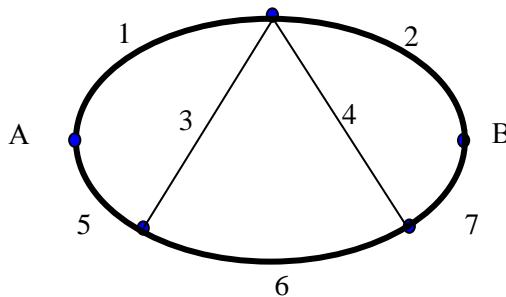


Рисунок 2.3 - Граф надійності систем з резервуванням

Передавання інформації та її обробка виконується по шляху від

вершини А до вершини В. Переріз ребер 1 та 5, або 2 та 7 призводить до відмови системи. Іноді, для більшої наочності, ребра графа замінюють прямокутниками з назвою підсистем, в цьому випадку граф перетворюється в **структурну схему надійності** системи.

Відзначимо, що структурна схема надійності не завжди відповідає функціональній структурі системи.

## 2.3 Надійність систем при навантаженому резерві

Для будь-яких нерезервованих систем граф або структурна схема надійності є послідовно включеними вершинами (підсистемами), відмови яких є незалежними випадковими подіями. Для таких систем імовірність безвідмовної роботи  $P_{\text{посл}}$  знаходять як добуток імовірностей безвідмовної роботи підсистем  $P_i$ .

$$P_{\text{посл}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (2.1)$$

де  $p_i$  - імовірність безвідмовної роботи підсистеми для визначеного моменту часу  $p_i(t)$ . Розраховується по обраній моделі надійності, наприклад, експоненційної:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}. \quad (2.2)$$

Інтенсивність відмов системи знаходиться за формулою

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i, \quad (2.3)$$

де  $\lambda_i$  - таблична (довідкова) інтенсивність відмов елемента групи  $N_i$ .

Для резервованих систем (навантажених) характерно паралельне включення  $n$  підсистем, тоді імовірність відмов визначається як добуток імовірностей відмов підсистем:

$$Q = 1 - P_{\text{нап}} = \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (2.4)$$

Перетворивши (2.4), одержимо формулу імовірності безвідмовної роботи системи з навантаженим резервуванням

$$P_{\text{нап}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (2.5)$$

Під час розрахунку паралельно-послідовних структур надійності, як правило, ведуть поступове перетворення паралельного підключення в послідовне, спрощуючи схему. Розглянемо приклад спрощення структурної схеми надійності, що наведена на рисунку 2.4. Замінімо спочатку паралельні підсистеми 2 і 3 новою підсистемою 23 (рисунок 2.4б). Тоді одержимо:

$$p_{23} = 1 - (1 - p_2)(1 - p_3)$$

Тепер замінімо послідовні системи 1 і 23, 4 і 5 на 123 і 45 відповідно (рисунок 2.4в), визначивши імовірність безвідмовної роботи як:

$$P_{123} = P_1 P_{23},$$

$$P_{45} = P_4 P_5.$$

Замінімо структуру 123 і 45 на 12345 (рисунок 2.4г), після чого одержимо імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_{\text{пар.с}} = P_{12345} = 1 - (1 - p_{123}) \cdot (1 - p_{45}).$$

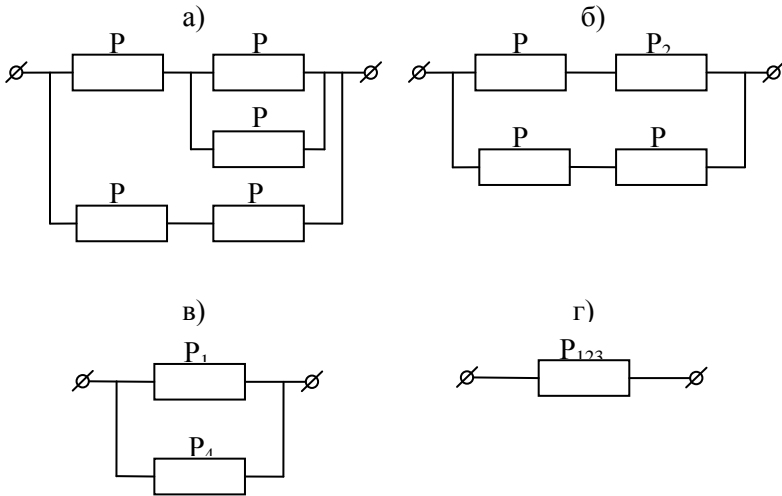


Рисунок 2.4 - Етапи спрощення структурної схеми надійності системи

Середнє напрацювання на відмову визначається за формулою:

$$\bar{t}_c = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.6)$$

Розглянемо випадок, коли система має  $n$  резервованих навантажених підсистем. При незалежних відмовах та експонентній моделі з однаковим параметром  $\lambda$ , одержимо

$$\bar{t}_c = \int_0^{\infty} (1 - (1 - e^{-\lambda t})^n) dt = \frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right). \quad (2.7)$$

В випадку, коли система має  $n$  резервованих ненавантажених підсистем при незалежних відмовах та експонентній моделі з однаковим параметром  $\lambda$ , одержимо:

$$T_{CP.} = \sum T_{CP.i.}$$

Графік залежності MTBF відносно кратності  $n$  резервування представлений на рисунку 2.5.

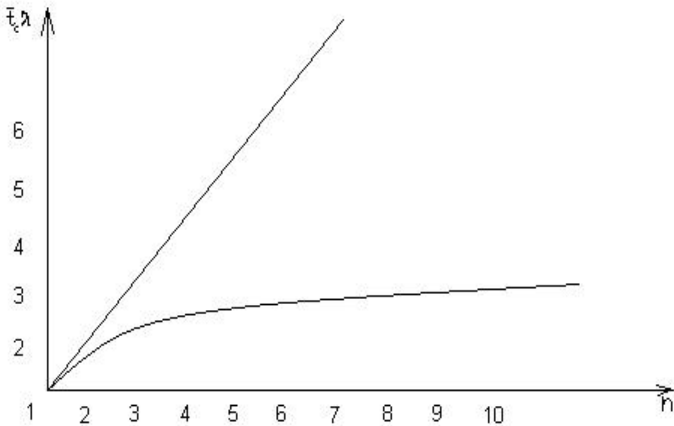


Рисунок 2.5-Графік залежності середнього часу напрацювання на відказ від кратності резерву

Середній час безвідмовної роботи в резервованій навантаженій системі зростає спочатку швидко відповідно до зростання  $n$ , але подальше збільшення  $n$  неефективне. Графік показує, що система із ненавантаженим резервом має вищу надійність ніж з навантаженим.

## 2.4 Мета роботи

Одержати практичні навички побудови зв'язаного графа надійності, структурної схеми надійності для складної резервованої обчислювальної системи з подальшим перетворенням структури для розрахунку основних показників надійності при навантаженому та ненавантаженому резерві.

## 2.5 Послідовність проведення роботи

Одержавши плати (вузли), або електричні схеми пристрою, для якого ведеться розрахунок показників надійності, і, вивчивши їх, студент визначає загальну кількість резервованих блоків системи, складаючи початкову для розрахунку таблицю типу таблиці 2.1.

Вважаємо, що пристрій складається з трьох, чотирьох або п'яти блоків (варіант визначається по журналу групи).

Пристрій працездатний тільки тоді, коли працездатні всі основні

блоки. Кількість резервованих блоків і їхній зв'язок вибирається згідно зі схемами або самостійно.

Побудувати графи, структурні схеми надійності і розрахувати основні показники: інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову, імовірність безвідмовної роботи за 100, 1.000, 10.000, 100.000 годин для блоків (плат) і пристрою.

Розрахунок виконувати:

- при нерезервованих блоках;
- при навантаженому резерві (кожен блок резервується від 1 до 3 разів за побажанням студента).

## **2.6 Обробка результатів**

Всі розрахунки звести в таблицю типу таблиці 2.1. Побудувати графи, структурні схеми надійності, графіки  $P(t)$  для точок 100, 1.000, 10.000, 100.000 годин для нерезервованих та резервованих систем. Зробити висновки про якість прогнозування та інше, привести основні розрахункові формули і розрахунки, оформити та захистити звіт по контрольним запитанням.

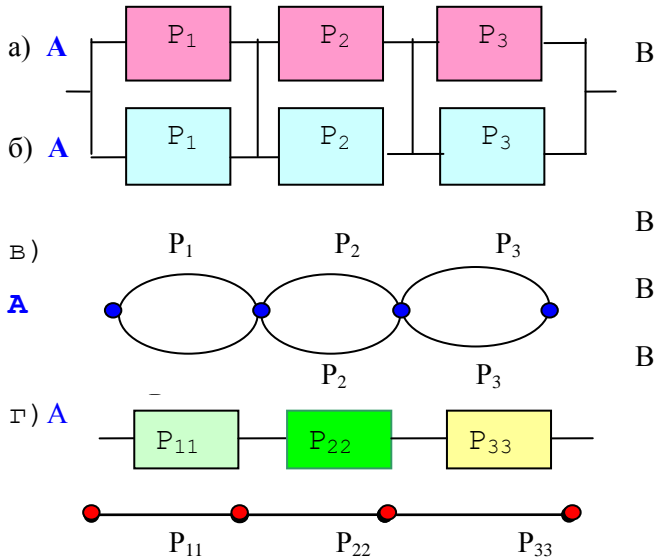
Приклад таких розрахунків наведено в таблиці 2.1. Він показує, що імовірність безвідмовної роботи для нерезервованих систем значно менша ніж імовірність безвідмовної роботи резервованих систем.

В прикладі резервування виконано роздільно по кожному функціональному блоку системи із кратністю один. Резерв “гарячий”, з навантаженням. Граф та структурна схема надійності наведені на рисунку 2.6.

При розрахунках проведено умовне перетворення паралельного підключення блоків до послідовного.

Таблиця 2.1 - Приклад розрахунку показників надійності

Назва РЕ	$\lambda_i$	Блок 1		Блок 2	
		$N_i$	$N_i \lambda_i$	$N_i$	$N_i \lambda_i$
Інтегр.схеми	50	80	4000	120	6000
Транзистори	12	25	300	20	240
Резистори	7	32	224	25	175
Діоди	10	30	300	28	280
Конденсатори	50	26	1300	40	2000
Роз'єм	1	100	100	150	150
Пайка	1	600	600	500	500
$\lambda_c=16169/10^7$		$\lambda_1=6824/10^7$		$\lambda_2=9345/10^7$	
$T_{CP}=1/\lambda_c=618$		$\bar{t}_1=1/\lambda_1=1465$		$\bar{t}_2=1/\lambda_2=1070$	
<b>Нерезервовані блоки (100, 1.000, 10.000, 100.000<sub>ГОД.</sub>) <math>P_i=e^{-\lambda_i t}</math></b>					
$P_{C.,100}=\prod P_i=0,85163$		$P_{1,100}=0,93447$		$P_{2,100}=0,91136$	
$P_{C.,1000}=\prod P_i=0,20069$		$P_{1,1000}=0,50774$		$P_{2,1000}=0,39527$	
$P_{C.,5000}=\prod P_i=0,00033$		$P_{1,5000}=0,03374$		$P_{2,5000}=0,00965$	
$P_{C.,10000}=\prod P_i=0,00000$		$P_{1,10000}=0,00114$		$P_{2,10000}=0,00009$	
<b>Резервовані блоки (100, 1.000, 10.000, 100.000<sub>ГОД.</sub>) <math>P_i=1-(1-P)^2</math></b>					
$P_{C.p.,100}=\prod P_i=0,98788$		$P_{1,100}=0,99571$		$P_{2,100}=0,99214$	
$P_{C.p.,1000}=\prod P_i=0,48059$		$P_{1,1000}=0,75768$		$P_{2,1000}=0,63430$	
$P_{C.p.,5000}=\prod P_i=0,00127$		$P_{1,5000}=0,06635$		$P_{2,5000}=0,01920$	
$P_{C.p.,10000}=\prod P_i=0,00000$		$P_{1,10000}=0,00228$		$P_{2,10000}=0,00019$	



а) структурна схема для резервованої системи, б) її граф;  
 в) спрощена структурна схема резервованої системи, г) її граф.  
 Рисунок 2.6 - Граф та структурна схема надійності

З рисунку 2.6 а), б) видно, що для резервованих систем існує два шляхи від вершини А до вершини В.

Шляхи від вершини А до вершини В для резервованих систем виходять з кожної вершини в двох напрямках, проходячи через однотипні функціональні блоки, вони збігаються в наступній вершині, тому раптова відмова будь-якого з трьох блоків не призводить до відмови всієї системи.

Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи для нерезервованої та резервованої систем наведені на рисунку 2.7.

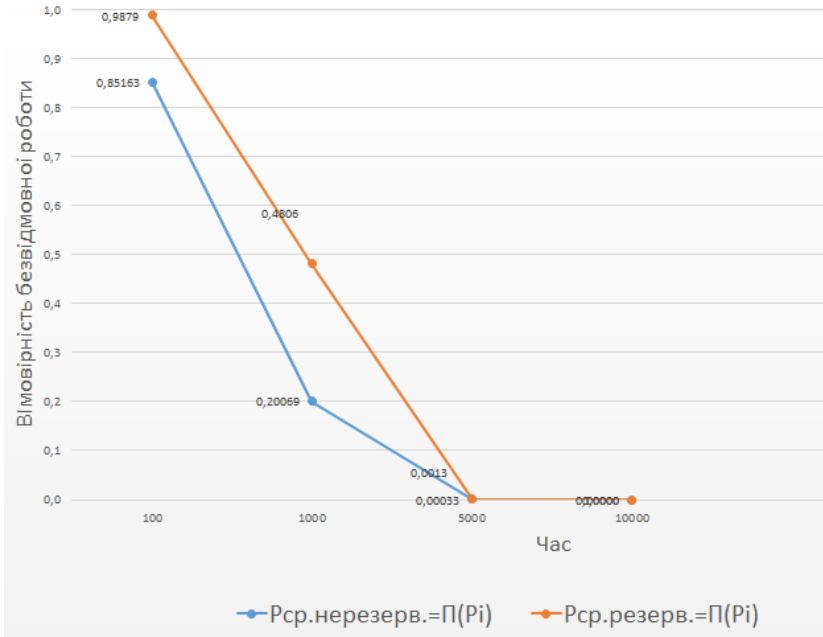


Рисунок 2.7 - Графіки залежності ймовірності безвідмовної роботи для нерезервованої та резервованої систем

Надійність систем із ненавантаженим резервом взагалі вища за рахунок допущення того, що інтенсивність відмов резервних підсистем  $\lambda_{\text{рез.}}=0$  до початку підключення до роботи, а напрацювання на відмову складає суму із часу роботи основної та резервної підсистеми. Але значною проблемою є необхідність швидкого переключення резервної підсистеми до роботи, особливо в КС.

## 2.7 Контрольні запитання

1. Дати визначення у загальному виді ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  приладів ОС при кратному резервуванні.
2. Дати визначення основних засобів резервування та їх класифікацію.
3. Перетворити паралельну структурну схему надійності в пос-

лідовну з визначенням формул у загальному вигляді  $P_c(t)$ .

4. Привести та обґрунтувати формулу часу напрацювання на відказ системи із  $n$  ненавантаженим загальним резервом.

5. Формула середнього часу безвідмовної роботи  $T_{\text{ср.}}(n)$  системи з  $n$  кратним, навантаженим, загальним резервом.

6. Привести графік залежності часу напрацювання до відказу від кратності резерву.

7. Дати визначення графа та структурної схеми надійності, привести приклади для резервованих і нерезервованих систем.

8. Дати порівняльну характеристику щодо “гарячого”, “холодного” та “теплого” резервів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭС. — М.: Радио и связь, 1991. — 322 с.
2. Белецкий В.В. Теорія і практичні методи резервування РЭА, М., Наука. 1977р.-380с.
3. Ненашев А.П. Конструирование РЭС. — М.: Высш. шк., 1990. — 432с.
4. Васілевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. — Вінниця: ВНТУ, 2010. — 129с.
5. Ивченко В.Г. Конструирование и технология ЭВМ. Конспект лекций. - /Таганрог: ТГРУ, Кафедра конструирования электронных средств. — 2001. — <http://www2.fep.tsure.ru/russian/kes/books/kitevm/lekpart1.doc>
6. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.-528 с.
7. Технология приборостроения: Учебник / Под общей редакцией проф. И.П.Бушминского. — М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана.[Електронний ресурс]. Режим доступу URL: <http://www.engineer.bmstu.ru/res/RL6/book1/book/metod/tpres.htm>
8. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем. Учебное пособие — Московский государственный институт электроники и математики. — М.: 2002. — 113с.
9. Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики: конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 64 с.
10. Patrick P. O'Connor, Andre Kleyner. Practical Reliability Engineering. — Wiley, 2012. - 512 p. ISBN-13: 978-0470979815.