

## Лекція №1

### *1. Основи теорії надійності*

#### *Вступ:*

В теперішній час вимоги до надійності технічних засобів (ТЗ) постійно підвищуються. Це пов'язано з тим, що від правильної роботи ТЗ залежать хід виконання технологічних процесів, достовірність отриманих результатів вимірювань і обробки даних. Питанням підвищення надійності ТЗ на всіх етапах їх проєктування та виробництва має приділятись найбільша увага.

Забезпечення необхідного рівня надійності ТЗ потребує вирішення спеціального комплексу інженерних задач. Однією із перших задач є нормування показників надійності ТЗ.

Нормування вимог до надійності необхідне як для самого ТЗ та його складових частин, так і для планів випробувань, для точності отриманих вихідних даних, формулювання критеріїв відмов, пошкоджень та граничних станів, для методів контролю надійності на всіх етапах використання ТЗ.

Тому знання основних питань нормування показників надійності ТЗ є нині необхідною умовою для успішної роботи в галузі автоматизації технологічних процесів і особливо тим спеціалістам, які будуть займатись розробкою засобів вимірювальної техніки та систем управління і автоматики.

#### *1.1 Загальні положення теорії надійності:*

Для нормативного забезпечення методів та засобів вимірювання з необхідним рівнем надійності використовується система стандартів «Надійність у техніці». Ця система відповідно до міжнародного стандарту ISO 8402-86, державних стандартів ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення» та ДСТУ 3004-95 «Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними» забезпечує ефективність технічних та експлуатаційних заходів для досягнення необхідного рівня надійності технічних засобів.

Питаннями надійності ТЗ займається наука, яка називається **теорією надійності**, основною задачею якої є вивчення закономірностей виникнення відмов ТЗ. Ця наука базується на теорії ймовірності та математичної статистики.

**Надійністю** називається властивість ТЗ виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення своїх характеристик в заданих межах при певних умовах використання, технічного обслуговування, збереження і транспортування.

Надійність включає в себе такі властивості як безвідмовність, довговічність, збереженість та ремонтопридатність.

*Нормування надійності* – це встановлення у нормативно-технічній та конструкторській документації кількісних і якісних вимог до надійності ТЗ.

Розглянемо основні терміни та визначення, що використовуються в теорії надійності згідно вищезгаданих стандартів.

**Працездатність** – стан ТЗ, при якому він здатний виконувати задані функції з параметрами, встановленими в технічній документації.

**Відмова** – подія, що вказує на порушення працездатності ТЗ.

**Граничний стан** – стан ТЗ, при якому його застосування стає неприпустимим або недоцільним.

**Довговічність** – властивість ТЗ зберігати робочий стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонтів.

**Ремонтопридатність** – властивість ТЗ у відновленні робочого стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів.

**Ресурс** – напрацювання ТЗ від початку його експлуатації чи відновлення після ремонту до переходу у граничний стан.

Конструктивно всі ТЗ можна розділити на не відновлювані та відновлювані. Невідновлюваними називають такі ТЗ, що не можуть ремонтуватись, а відновлювальні – ремонтуються.

## 1.2 Показники надійності невідновлюваних ТЗ.

Основними нормованими показниками надійності не відновлюваних ТЗ можуть бути такі показники:

- ймовірність безвідмовної роботи,  $P(t)$ ;
- ймовірність відмови,  $Q(t)$ ;
- частота відмов  $a(t)$ ;
- інтенсивність відмов,  $\lambda(t)$ ;
- середнє напрацювання до першої відмови,  $T_{CP}$ .

Уявімо собі, що ми увімкнули в мережу будь-який простий пристрій, наприклад, лампочку розжарення. Увімкнули і будемо чекати, поки вона перегорить. Нехай наша лампочка перегорить через 500 год., а друга лампочка до перегорання буде світити, наприклад, 1000 год. Інтуїтивно можна стверджувати, що друга лампочка більш надійна. Але ми дійшли цього висновку лише тоді, коли отримана інформація вже не має для нас сенсу, бо використати в подальшому лампочки ми не можемо. З іншого боку, якщо ці лампочки різних виробників, то у нас з'являються деякі підстави вважати, що лампочки другого виробника більш надійні, принаймні за ознакою тривалості роботи. Але й ці підстави досить примарні, тому що результат нашого експерименту може виявитися випадковим через те, що лампочка первого виробника, яку ми взяли для експерименту, мала, наприклад, деякий дефект, який не був помічений відділом технічного контролю (ВТК).

Для більшої упевненості в результаті ускладнимо експеримент і візьмемо не по одній лампочці, а, наприклад,  $N = 100$  шт. одного виробника і стільки ж іншого. Увімкнемо їх в мережу і через певні проміжки часу  $\Delta t$  будемо фіксувати кількість лампочок  $N(t)$ , що вже перегоріли на момент часу  $t$ . В результаті отримаємо залежність, яка буде мати приблизно такий вигляд, як показано на рис. 1.1.

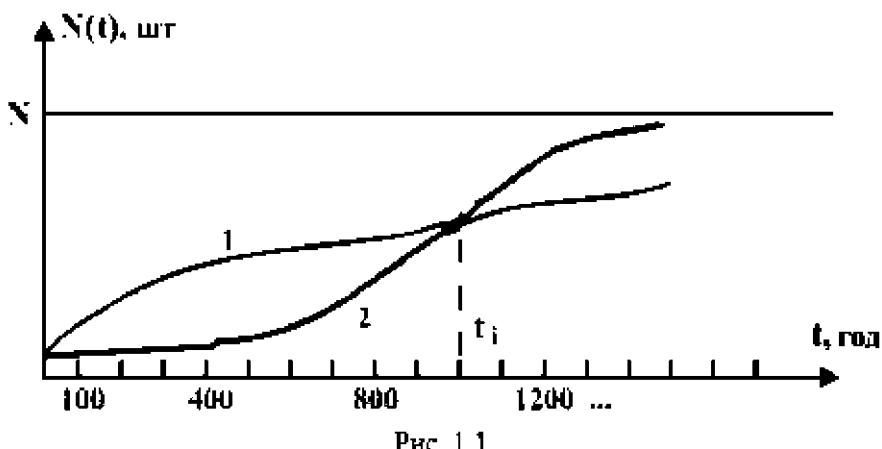


Рис. 1.1

Криві цієї залежності можуть мати і дещо інший вигляд, але загальними у них завжди будуть такі властивості:

1) криві починаються в точці з нульовими координатами, тому що експеримент проводиться зі справними об'єктами, тобто  $N(0) = 0$ .

2) кожна крива не спадає, тому що з часом кількість несправних об'єктів не зменшується, тобто  $dN(t)/dt \geq 0$ ;

3) при  $t \rightarrow \infty$  кожна крива асимптотично наближається до значення  $N(t) = N$  (нічого вічного немає, і рано, чи пізно всі об'єкти вийдуть з ладу, а наші лампочки перегорять).

Такі криві, отримані в результаті експерименту, або на основі обробки статистичних даних сервісних служб, називають **функціями ненадійності**. Якщо експеримент проведено коректно і з великою кількістю випадково выбраних виробів, то функція ненадійності містить вичерпну інформацію про очікувану поведінку об'єктів протягом усього їх “життєвого циклу”. Які ж висновки можна зробити, аналізуючи, наприклад, криві 1 і 2 (Рис. 1.1), що відповідають об'єктам 1-ї і 2-ї групи?

До моменту  $t_1$  лампочки першого виробника (крива 1) виявляються менш надійними, тому що кількість об'єктів, що вийшли з ладу, за весь цей період і в кожний момент часу більша, ніж для об'єктів другого виробника (крива 2). Після моменту  $t_1$ , навпаки, крива 2 іде вище кривої 1, тобто для більш тривалої роботи виявляються кращими лампочки другого виробника. Вже з цих простих розмірковувань можна зробити важливий висновок: **надійність залежить від часу, протягом якого, як ми розраховуємо, повинен працювати наш прилад.** Саме тому не можна віддати однозначну перевагу першому, чи другому виробникові – все залежить від того, протягом якого часу ми плануємо експлуатувати об'єкт.

Не було б жодних проблем, якби ми мали всю цю інформацію. З лампочками у цьому відношенні все більш-менш гаразд. Лампочка – традиційний електротехнічний прилад, виробники відомі, і є достовірна статистика про поведінку лампочок за тривалий час їх експлуатації. До того ж, провести випробування лампочок на надійність не дуже й важко – це прості і дешеві вироби, і вихід їх з ладу легко можна зафіксувати.

А що робити, коли об'єкти більш складні і дорогі? І справа не тільки в складності і вартості. Якщо середня тривалість безперервної роботи звичайної лампочки складає 500 – 1000 год., то такі об'єкти, як транзистори, інтегральні схеми (ІС), навіть великого рівня інтеграції, працюють десятки і сотні тисяч годин, а це означає, що експеримент, про який йшла мова, буде тривати принаймні кілька років (!). Але ж за цей час з великою ймовірністю на ринку з'являться нові компоненти,

виготовлені за іншою технологією, і за цей час отримана в результаті експерименту інформація перестане бути актуальною. Така ж ситуація має місце не тільки для окремих компонентів, але й для багатьох суто електронних приладів (комп'ютерів, телевізорів, мобільних телефонів, тощо). Можна сказати, що саме висока надійність означених об'єктів, як це не парадоксально, є перешкодою для її визначення. Який же вихід з цієї ситуації?

Один із шляхів полягає у спробі знайти вигляд залежності ненадійності від часу для найбільш поширеніх електронних приладів і отримати аналітичний вигляд цієї залежності для створення можливості прогнозування надійності та відповідних розрахунків. Тому перейдемо безпосередньо до аналізу такої залежності.

Можна показати (ми на цьому детально затримуватись не будемо), що відносна кількість об'єктів  $N(t)/N$ , які втратили працездатність та момент часу  $t$ , є не що інше, як ймовірність відмови  $Q(t)$  за час  $t$ . Таке тлумачення є типовим при переході від статистичного розгляду масових подій до їх імовірнісного представлення. Величина

$$P(t) = 1 - Q(t)$$

– це ймовірність безвідмової роботи об'єкту за час  $t$ . Легко зображені, що вигляд залежності  $P(t)$  є зворотним по відношенню  $Q(t)$  (рис. 1.2), тобто дзеркальним відбиттям залежності  $Q(t)$ . Нагадаємо, що конкретний вигляд залежності  $Q(t)$  і, відповідно,  $P(t)$  нам невідомий. Ми знаємо лише кінцеві точки цієї залежності:  $P(0) = 1$  і  $P(\infty) = 0$ , та її основну властивість –  $Q(t)$  часом зростає ( $dQ(t)/dt \geq 0$ ) і, відповідно,  $P(t)$  – спадає ( $dP(t)/dt \leq 0$ ).

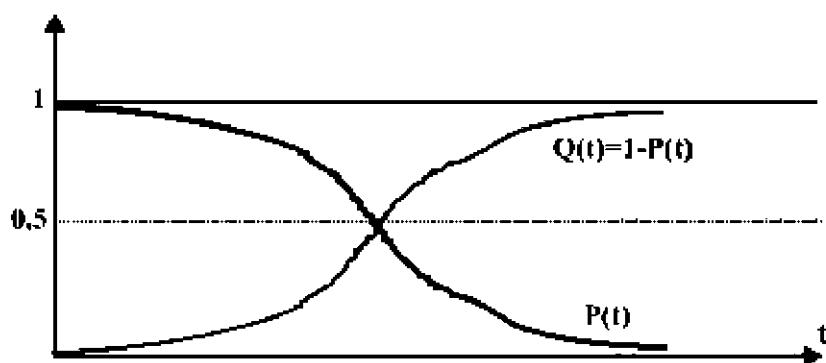


Рис.1.2

В термінах теорії ймовірностей  $P(t)$  – це функція розподілу ймовірностей безвідмової роботи об'єкту, яка характеризує ймовірність такої події, що об'єкт за час  $t$  не втратить працездатності. Але ця функція не дуже зручна для практичного використання. Справа в тім, що

здебільшого нас цікавить не ймовірність безвідмовної роботи пристрою за час від самого початку його “життя”, а ймовірність, віднесена до певного проміжку часу експлуатації, наприклад, з моменту  $t_1$  до моменту  $t_2$ .

Позначимо цю ймовірність через  $P(t_1, t_2)$ . Очевидно, має сенс розглядати лише таку ситуацію, коли об'єкт в момент  $t_1$  ще залишається працездатним. Ймовірність такої події  $P(t_1)$ . А ймовірність того, що об'єкт буде працездатним ще проміжок часу від  $t_1$  до  $t_2$  -  $P(t_1, t_2)$ . Тому ймовірність події, що об'єкт буде працездатним в момент часу  $t_2$ , можна записати як добуток

$$P(t_2) = P(t_1) P(t_1, t_2),$$

звідки отримуємо корисну формулу для обчислення ймовірності безвідмовної роботи об'єкту за довільний проміжок часу  $t_1 \dots t_2$

$$P(t_1, t_2) = P(t_2)/P(t_1)$$

Ймовірність безвідмовної роботи є одним із основних показників надійності технічних виробів, але він не завжди зручний для інженерних розрахунків. Справа в тім, що значення  $P(t_1, t_2)$  за відносно короткі проміжки часу (дoba, години) для сучасних електронних приладів дуже близька до 1. Наприклад, ймовірність безвідмовної роботи типової інтегральної схеми за кілька годин роботи складає 0,999999...0,9999999. Проводити розрахунки з такими числами незручно. Тому доцільно перейти до відповідних ймовірностей відмови –  $10^{-7} \dots 10^{-6}$ .

По суті, функція розподілу є інтегральною (“накопичувальною”) характеристикою надійності в тому розумінні, що вона враховує всю попередню поведінку об'єкту з точки зору його працездатності. Нас же здебільшого може цікавити “миттєве” значення надійності в певний момент часу. З погляду на це, більш наочним і зручним є використання густини функції розподілу  $dP(t)/dt$ , яка має фізичний зміст частоти відмов та розмірність 1/год.

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Вигляд цієї функції вказує, як часто відбуваються втрати працездатності протягом життєвого циклу об'єкту. Графічний вигляд  $f(t)$  дає наочну картину зміни надійності об'єкту в часі. Наприклад, для функції розподілу (рис. 1.3 а) густина розподілу буде мати вигляд (рис. 1.3 б).

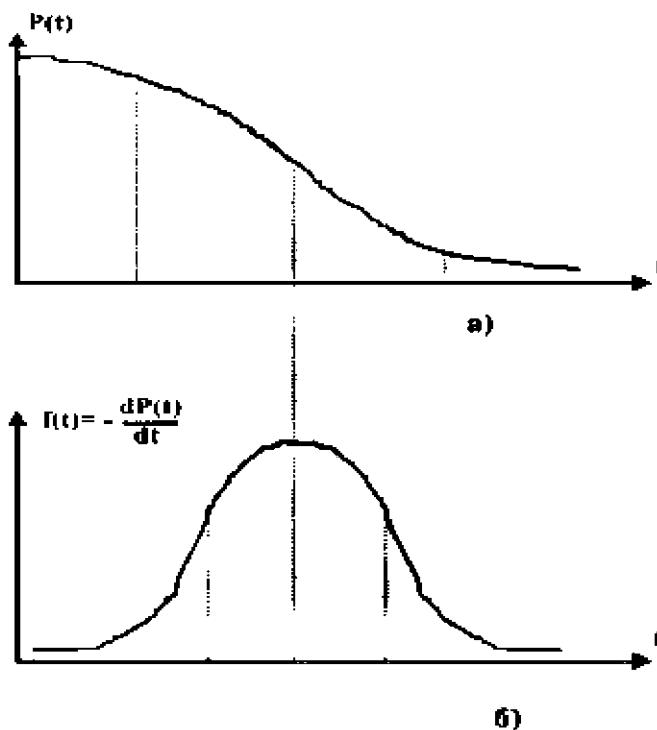


Рис.1.3.

З цього рисунку бачимо, що у інтервалі  $t_1 \dots t_2$  частота відмов об'єкту максимальна, але згодом зменшується. Така поведінка  $f(t)$  – зменшення частоти відмов на кінцевому інтервалі життєвого циклу – не відповідає фізичній природі процесів деградації (старіння) об'єкту при тривалій експлуатації. Глибша причина такого ефекту криється в самому експерименті, з якого ми почали наш розгляд. Згадаймо, на випробування поставлено фіксовану кількість об'єктів  $N$ . З часом кількість об'єктів, які залишаться працездатними (“живими”), поступово зменшується і, відповідно, зменшується частота відмов  $f(t)$ . Формально це еквівалентно начебто зростанню надійності, але таке зростання суперечить фізичній природі надійності. Для того, щоб усунути такий небажаний ефект, штучно збільшують частоту відмов. Математично це можна зробити, поділивши  $f(t)$  на  $P(t)$  і ввівши новий показник надійності – інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{P(t)dt}.$$

( Ділення на  $P(t)$  збільшує частоту відмов, тому що величина ймовірності завжди менше 1, до того ж ця ймовірність на кінцевому етапі різко зменшується ).

Треба однак зазначити, що для сучасних електронних приладів та їх компонентів у відносно короткі проміжки часу різниця між  $f(t)$  та  $\lambda(t)$  невелика і, принаймні, має одинаковий порядок.

До цього часу ми розглядали функції розподілу довільного вигляду, аж ніяк не конкретизуючи її хід детально. Із досвіду та відомої статистики, накопиченої за багато років експлуатації технічних об'єктів, можна стверджувати, що типовий хід залежності інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  від часу має вигляд, показаний на рис. 1.4. На цій кривій виразно виділяються три етапи “життя” виробу.

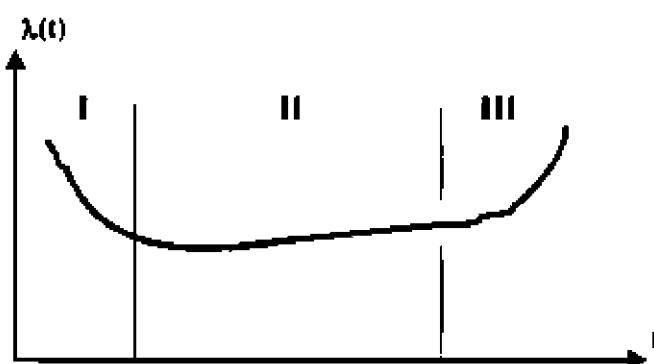


Рис. 1.4.

Етап I відповідає початковому періоду функціювання об'єкту і характеризується відносно високим рівнем інтенсивності відмов, яка досить швидко зменшується. Це етап припрацювання коли проявляються не помічені вихідним контролем дефекти виробництва, які свідчать про недосконалість такого контролю. Теоретично, чесний по відношенню до користувача виробник цей етап повинен завершити у себе до передачі виробів для експлуатації. Іноді говорять, що на цьому етапі потенційно ненадійні вироби “вигорають”. Для прискорення цього процесу застосовують вихідні “прогонки” і “тренування” виробів в граничних режимах (за температурою, вологістю, напругами живлення, тощо).

Етап II – це період нормальної експлуатації виробу. Інтенсивність відмов в цей період стабілізується, має відносно невеликий рівень і в

загальному випадку дещо зростає через старіння компонентів та інші фактори.

На етапі III починається інтенсивна деградація виробу, кількість відмов різко зростає, і експлуатація може стати недоцільною через значні втрати на проведення ремонтних (відновлювальних) робіт. Початок етапу III визначає **технічний ресурс** виробу. Природно, що у більшості випадків нас буде цікавити частина залежності саме на етапі II, оскільки це проміжок часу, що відповідає періоду нормальної експлуатації об'єкту.

Природно, що у більшості випадків нас буде цікавити частина залежності саме на етапі II, оскільки це проміжок часу, що відповідає періоду нормальної експлуатації об'єкту

## Лекція № 2

### Експоненціальний та інші розподіли ймовірності безвідмової роботи

Показана на рис.1 крива інтенсивності відмов характерна для електронних апаратів та їх компонентів.

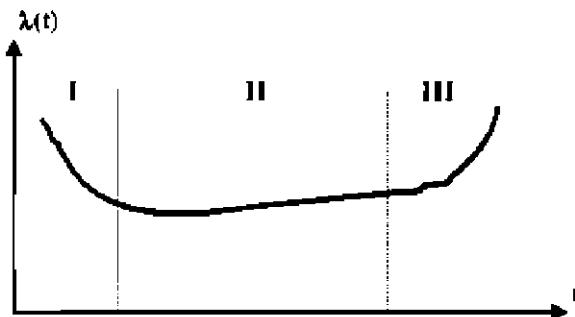


Рис.1.

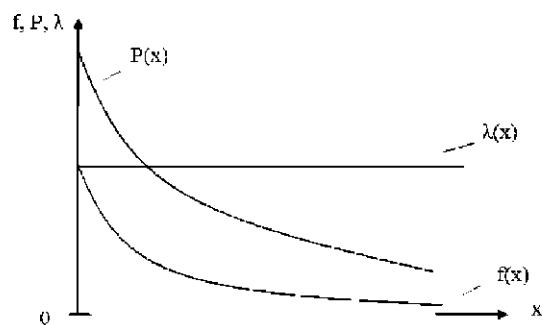
Саме для такого класу об'єктів інтенсивність відмов тривалий час залишається практично постійною, тобто  $\lambda(t) = \lambda \approx \text{const}$ . Тривалість цього періоду для більшості електронних компонентів ( IC, транзисторів, конденсаторів, діодів, резисторів, тощо ) вимірюється роками, тому вважають, що за реальні строки експлуатації електронного обладнання суттєвої деградації і старіння компонентів не відбувається. Наприклад, дослідження на фізичному рівні методом електронної мікроскопії свідчать, що навіть за 20 – 30 років жодних помітних змін у структурі  $p-n$  переходів не відбувається.

Однак ця властивість характерна лише для електронних компонентів і не може бути віднесена до елементів електромеханічного типу ( реле, потенціометри, роз'єми ) та електронновакуумних приладів ( кінескопи, індикатори, тощо ).

Для електронних компонентів приладів можна показати, що ймовірність їх безвідмової роботи описується експоненціальним законом розподілу, тобто зменшується як експонента.

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

**Експоненціальний розподіл** в теорії ймовірності є одним із найпростіших. Він повністю визначається лише одним параметром  $\lambda$ . Для засобів з експоненціальним розподілом ймовірності безвідмової роботи характерно, що вони залишаються весь час мовби новими.



Це означає, що, наприклад, між ІС, випаяною із пристрою, що деякий час пропрацював, і новою, з точки зору надійності немає жодної різниці. *Можна вважати, що більшість електронних компонентів за реальний час експлуатації ( кілька років ) не старіс, тобто де градаційні процеси, настільки незначні, що їх можна не враховувати.*

Інша властивість експоненціального розподілу полягає у наступному. Нехай маємо комп'ютерну мережу, що складається із  $n$  ПК. Мережа вважається працездатною лише тоді, коли всі її комп'ютери працездатні. Таке з 'єднання називають послідовним. *Тоді ймовірність безвідмовної роботи мережі  $P_c(t)$  с добутком ймовірностей безвідмовної роботи компонентів*, тобто

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{(-\sum_{i=1}^n \lambda_i)t},$$

або

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

*Це означає, що інтенсивність відмов системи є сумою інтенсивностей відмов компонентів.* Але це твердження справедливо коли  $\lambda(t) = \text{const}$ . В інших випадках розрахунки суттєво ускладнюються через залежність інтенсивності відмов від часу. Тому справедливою залишається лише формула

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

Для технічних засобів, в яких відбуваються помітні процеси старіння ( механічні , електромеханічні, гумотехнічні, тощо ) застосовують інші розподіли. Серед них найбільш універсальним є нормальній розподіл ( Гауса ), для якого частота ймовірності

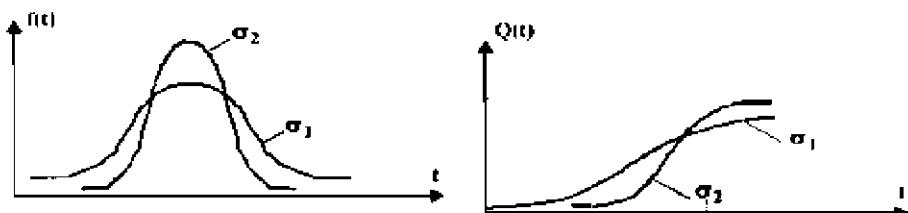
$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$$

того, що об'єкт відмовить за час, менший, ніж  $t$ , є площа під відповідною ділянкою кривої розподілу

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} dt$$

, де  $T$  – математичне сподівання або, в термінах теорії надійності, середній час безвідмовної роботи об'єкту;  $\sigma$  - середнє квадратичне відхилення від середнього часу безвідмовної роботи

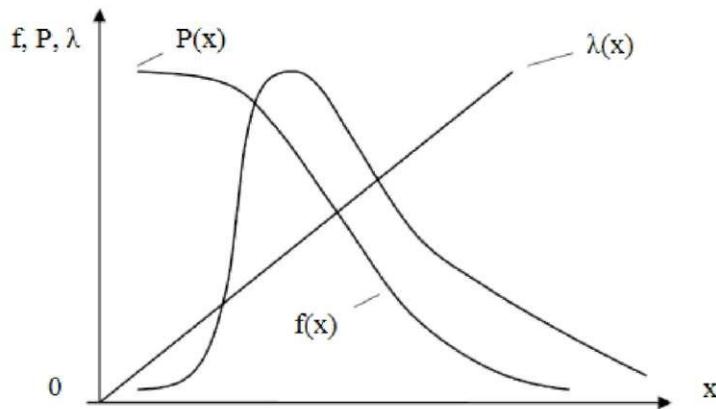
Графіки функцій  $f(t)$  і  $Q(t)$  зображені на рисунку.



Ще одним розподілом, який широко застосовують в теорії надійності, є розподіл Вейбула. Цей розподіл є універсальним, оскільки при зміні параметрів він може описувати будь-які процеси: нормальній розподіл, експоненціальний.

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

, де  $\lambda$  та  $\beta$  - параметри моделі. Приблизно  $\beta = 0,2 \dots 0,4$  – для електронних пристрій і  $\beta = 1,2 \dots 1,4$  для механічних пристрій з поступовим характером відмов.



Слід зауважити, що всі згадані розподіли є лише математичними моделями фізичних процесів, що відбуваються у внутрішній структурі компонентів і матеріалів, з яких вони побудовані. І тільки знання цих процесів може дати більш достовірну інформацію для прогнозування технічного стану об'єкта на тривалий період. До того ж потрібно розуміти, що, враховуючи статистичний характер поняття надійності, не можна сподіватися на велику точність розрахунків надійності ( помилка на один порядок не є винятковою ).

---

## Лекція №3

### Методи забезпечення надійності

З точки зору забезпечення надійності будь якого обладнання принциповою є можливість відновлення працездатності об'єкту у разі його відмови. Тому в теорії надійності всі об'єкти поділяють на відновлювальні об'єкти і не відновлювальні. Виходячи з того, що уникнути відмов компонентів на тривалий час неможливо, підхід до забезпечення надійності відновлювальних і не відновлювальних об'єктів зовсім різний. Для перших очевидний шлях полягає в організації ефективного ремонту обладнання з мінімальними затратами часу, для інших – у нейтралізації несправностей окремих компонентів у разі їх виникнення.

Для **відновлювальних об'єктів** за існуючими стандартами основним показником надійності прийнято вважати **коєфіцієнт готовності**, що визначає частину корисного часу  $t_k$ , протягом якого об'єкт нормально працює, по відношенню до загального часу експлуатації, тобто

$$K_r = \frac{t_k}{t_k + t_B}$$

, де  $t_B$  - час, який витрачено на відновлювання працездатності до якого входять час на пошук несправності та час ремонту. Особливістю електронного обладнання є його модульна структура, тому відновлення може бути здійснено простою заміною несправного модуля справним. Ця процедура не вимагає багато часу. Основними методами забезпечення надійності відновлювальної електронної апаратури слід вважати:

- створення максимально сприятливих умов для прискорення ремонту – конструкція приладу має бути **ремонтопридатною**. Це означає, що має бути забезпечено зручний доступ для заміни несправних компонентів, з'єднання між типовими елементами заміни бажано передбачати на основі роз'ємів;
- застосування методів автоматизації пошуку несправностей на основі апаратного і програмного самоконтролю функціонування апаратури, тестового діагностування та використання спеціальних автоматизованих систем контролю та діагностики.

Тепер про **не відновлювальні об'єкти**. Неможливість ремонту зумовлена конструктивними особливостями або умовами експлуатації. Так, наприклад, інтегральна мікросхема або кінескоп є не відновлювальними об'єктами за конструктивною ознакою. Об'єкти, що працюють у важкодоступних місцях ( бортова космічна апаратура, морські буй, підземне обладнання ), у більшості випадків не можуть бути відремонтованими. Для них стратегія забезпечення надійності зовсім інша.

Запобігти виникненню несправностей принципово неможливо. До того ж необхідно враховувати сильну залежність надійності від складності об'єкту . Так, якщо ймовірність безвідмовної роботи одного компонента  $p$ , то ймовірність для системи, яка складається із  $N$  таких компонентів буде

$$P_C = p^N$$

Припустимо, для прикладу, що  $p = 0.99$ . Тоді можна обчислити зменшення  $P_C$  при зростанні кількості компонентів  $N$ .

$N$	1	10	20	30	40	50	60	70
$P_C$	0.99	0.9	0.91	0.73	0.65	0.58	0.52	0.47
$N$	80	90	100	200	300	400	500	
$P_C$	0.43	0.38	0.34	0.12	0.04	0.0136	0.0046	

Як бачимо, вже при  $N = 70$  наша система стає практично непрацездатною. В чому справа . Для пояснення уявімо, що на заводі працює 100 робітників і кожен з них необхідний для нормальної роботи закладу. Важко уявити, що ніхто із робітників не хворіє, не запізнюються. Ясно, що такий заклад майже ніколи не зміг би нормально функціонувати. Але ж сотні фабрик і заводів із значно більшою кількістю робітників працюють, не дивлячись на те, що частина персоналу щодня не виходить на роботу. Справа в тім, що при розумній організації виробничого процесу завжди повинні бути передбачені надлишкові працівники, з тим, що навіть неповний склад робітників зміг би нормально виконати заплановану роботу. Коли хтось захворіє, інший робітник повинен виконати його функцію. Саме в цьому полягає головна ідея побудови електронних систем із компонентами з обмеженою надійністю.

Такий підхід отримав назву **методу структурної надлишковості** і полягає у **введенні в систему деякої кількості надлишкових компонентів, які грають роль запасу (резерву) на випадок відмови основного обладнання.** Тут можна провести ще одну аналогію із механічними конструкціями, в яких роль надлишковості грає запас міцності.

Надлишковість може бути і **часовою**, коли за рахунок великої швидкості виконання тих, чи інших операцій їх можна виконати двічі або тричі і порівняти результат з тим, щоб переконатись у його правильності.

Але ж і інформація, яка є вихідною для обчислень або утворення керуючих впливів у системах управління, може містити помилки. Для того, щоб нейтралізувати їх дію, використовують третій вид надлишковості – **інформаційну надлишковість.** У цьому випадку застосовуються спеціальні методи кодування, які дозволяють виявляти та виправляти помилки.

Загальна ідея структурної надлишковості була відома давно. Д.Ладнер у статтях про обчислювальну машину Бебіджа ще у 1834 році писав; « *Найбільш конкретний і ефективний спосіб контролю помилок, що виникають у процесі обчислень, полягає в тому, щоб забезпечити виконання тих самих розрахунків на різних, не зв'язаних один з одним, обчислювачах, цей контроль виявляється ще більш ефективним, якщо обчислення виконуються різними способами.* »

Так у системі автоматичного керування польотом (автопілотом) літака Боїнг 737 стандартний блок складається з двох каналів обчислень, реалізованих трьома різними центральними процесорами.

**Метою введення структурної надлишковості** є збереження можливості системою виконувати задані функції при наявності помилок через несправності самої системи.

Принципою особливістю таких систем є багаторазові обчислення. Вони реалізуються шляхом  $n$  - кратного повторення обчислювального процесу в трьох розрізах: часовому (повторний рахунок), просторовому (на інших апаратних засобах) та інформаційному (з використанням інших програм і даних). Прикладом може служити система керування космічним кораблем «Шаттл», де  $n = 4$ .

Перейдемо тепер до більш детального розгляду методів і засобів забезпечення надійності.

### Резервування апаратури

Резервуванням називається метод підвищення надійності шляхом включення резервних елементів при розробці системи або в процесі її експлуатації. Розрізняють загальне та поелементне резервування. За способом включення резерву – постійне і заміщенням. У випадку резервування заміщенням резерв може бути ненавантаженим, полегшеним і навантаженим.

## ЛЕКЦІЯ №4

### Резервування апаратури

Резервуванням називається метод підвищення надійності шляхом включення резервних елементів при розробці системи або в процесі експлуатації.

Розрізняють загальне та поелементне резервування.

Зрозуміло, що резервування ускладнює апаратуру і може бути реалізовано не для усіх видів електронного обладнання. Наприклад, по елементне постійне резервування на рівні окремих радіоелементів ( резисторів, конденсаторів, транзисторів ) не може бути здійснено через неможливість забезпечити незмінність параметрів резервованої схеми у процесі виникнення несправностей. Хоча теоретично поелементне резервування є найбільш доцільним з точки зору апаратних витрат, на практиці його можна застосовувати головним чином на рівні функціонально закінчених блоків ( винятком є чисто цифрова апаратура, де поелементне резервування може бути здійснено на будь якому рівні ).

Загальне резервування ( резервується весь пристрій в цілому ) застосовується здебільшого у великих електронних схемах, багатокомп'ютерних комплексах та мережах і вимагає досить складного програмного узгодження функцій кожного компонента при втраті працездатності.

З точки зору ефективності найбільш привабливим слід вважати резервування заміщенням. Ідея цього методу дуже проста : коли основний елемент структури виходить з ладу , замість нього включається резервний. Це і є заміщення. Переваги такого способу резервування полягають в тому, що:

- Один резервний елемент може бути використаним для кількох основних;
- Резервні елементи можуть знаходитись в пасивному стані ( наприклад, бути зестримленими ), що зберігає їх технічний ресурс.

Розглянемо на прикладах, що це дає з точки зору підвищення надійності. Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи найпростішої структури ( один основний елемент  $A_O$  і один резервний  $A_P$  ), рис.1.

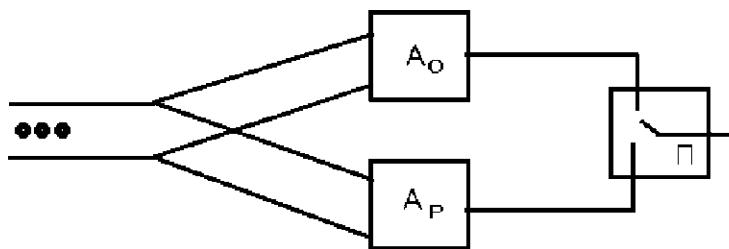


Рис.1.

Заміщення здійснює деякий перемикач  $\Pi$  ( це може бути і оператор ). Ймовірність безвідмовної роботи основного і резервного елементів –  $P$ .

Структура буде залишатись працездатною в таких ситуаціях:

- 1) обидва елементи ( основний та резервний ) працездатні, ймовірність такої події –  $p^2$  ;
- 2) основний елемент справний, резервний вийшов з ладу, відповідна ймовірність –  $p(1-p)$ ;

- 3) навпаки, резервний елемент справний, основний відмовив, відповідна ймовірність  
 $- (1 - p)p$ .

Ймовірність безвідмовної роботи структури можна записати як суму

$$P_C = p^2 + 2p(1 - p) = 2p - p^2$$

Враховуючи реальну надійність перемикача,

$$P_C = p_n (2p - p^2).$$

Нехай перемикач абсолютно надійний і ймовірність його безвідмовної роботи  $p_n = 1$ . Якщо  $p = 0.9$ , тоді маємо  $P_C = 0.99$ , тобто ймовірність відмови зменшилась на порядок з  $q = 0.1$  до  $Q_C = 0.01$ .

Розглянемо структуру, коли один резервний елемент використовується на два основних, ри.2.

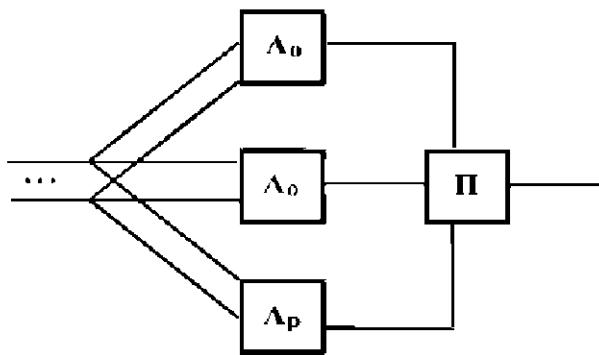


Рис.2.

У цьому випадку структура, очевидно, буде залишатись працездатною, коли працездатними будуть перемикач і хоча б два з трьох елементів (двох основних і одного резервного). Для ймовірності безвідмовної роботи структури можна записати

$$P_c = p_n [p^3 + 3p^2(1-p)] = p_n (3p^2 - 2p^3).$$

При тій же надійності основних та резервного елементів і  $p_n = 1$  отримаємо  $P_C = 0.982$ . Як бачимо, у порівнянні з попереднім прикладом, ефект у підвищенні надійності дещо гірший. Це можна пояснити меншим рівнем надлишковості.

У загальному випадку резервування заміщенням, коли з  $n$  елементів  $k$  є резервними, можна записати :

$$P_c = p_n \sum_{i=k}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i}.$$

Перейдемо тепер до розгляду класичного методу резервування.. Мова піде про метод Дж. Фон Неймана, який найчастіше називають **мажоритарним**. Це, по суті, постійне резервування із логічним переключенням на резервні елементи. У найпростішому випадку метод потребує мінімум потроїння апаратних витрат. Схема включення елементів структури показана на рис. 3

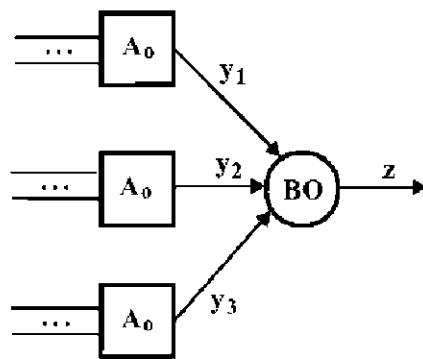


Рис.3 .

На всі три елементи подаються одинакові вхідні сигнали  $x_1, x_2 \dots, x, \dots$ . Вихідні сигнали  $y_1, y_2, y_3$  надходять на так званий відновлюючий орган (ВО), функція якого полягає в утворенні результируючого сигналу за більшістю значень  $y_1, y_2, y_3$ . Це так звана мажоритарна функція алгебри логіки. По суті, значення сигналу, який відрізняється від інших, ігнорується. Обґрунтувати такий алгоритм прийняття рішень можна таким чином.

Якщо позначити ймовірність відмови одного елемента через  $q$ , то ймовірність одночасної відмови зразу двох елементів (при незалежності цих подій) буде  $q^2$ . Очевидно, враховуючи, що  $q \ll 1$ ,

$$q^2 \ll q,$$

тому є всі підстави вважати, що відмовив саме один елемент, а не два одночасно. Так для сучасних елементів обчислювальної техніки ймовірність відмови за кілька годин роботи має порядок  $10^{-7} \dots 10^{-6}$ , тоді  $q^2 \approx 10^{-14} \dots 10^{-12}$ , і можна впевнено прийняти рішення про відмову саме одного елемента, а не двох одночасно. Зазначимо ще раз, що такі розмірковування чинні лише за умови незалежності відмов, тобто тільки в разі відсутності загальної першопричини відмов, наприклад, завад по колам живлення.

При більших рівнях надлишковості алгоритм прийняття рішень залишається таким самим – вихідний сигнал ВО визначається більшістю значень вхідних сигналів.

Принциповим недоліком даної структури є те, що ймовірність відмови всієї системи завжди менше ймовірності відмови відновлюючого органу. Для того, щоб зняти це обмеження, застосовують багатолінійні структури, в яких ВО теж  $n$ -кратно резервується.

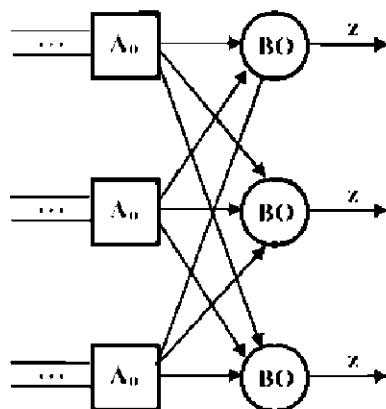


Рис.4 .

Найважливішим для таких структур є зниження обмежень на надійність ВО та можливість досягнення будь-якої високої надійності структури при зростанні рівня надлишковості  $n$ . Теоретично при деяких несуттєвих обмеженнях на початковий рівень надійності елементів  $P_e \rightarrow 1$  при  $n \rightarrow \infty$  (рис. 1.10). Це означає, що за рахунок надлишковості можна побудувати практично абсолютно надійні структури із компонентів, які мають обмежену надійність.

Окрім надлишковості для багатолінійних структур є характерним багатолінійні зв'язки між послідовними каскадами структури (Дж. Фон Нейман назвав їх “пучками зв'язків”), тобто всі сигнали в такій структурі розповсюджуються по багатьом каналам, що також сприяє підвищенню надійності. Однак з практичної точки зору виникає проблема “останнього ВО”, оскільки користувач повинен мати не  $n$  сигналів, а один. З цього виходить, що на кінцевому виході необхідно буде об'єднати сигнали, і цей останній ВО буде обмежувати надійність цієї структури.

На користь ефективності багатолінійних мажоритарних структур свідчать також дослідження нейрофізіологів: є деякі підстави вважати, що саме за таким принципом побудована більшість біологічних систем, зокрема наш мозок. Ті ж дослідження показують, що надлишковість біологічних систем на клітинному рівні дуже висока (принаймні, мова йде про порядки).

Для технічних об'єктів навіть для сучасної мікроелектроніки такий рівень, звичайно, нереальний. На сьогодні у випадках, коли необхідно забезпечити високий рівень надійності найчастіше застосовують потрійні апаратури ( $n = 3$ ), в деяких особливо відповідальних випадках застосування  $n = 4; 5$ , але більші рівні надлишковості є вже винятком.

Не зважаючи на поширеність мажоритарного методу, слід мати на увазі, що при  $n > 3$  цей метод не є оптимальним. Щоб довести це, розглянемо, наприклад, структуру з  $n = 4$ . Така структура при відмові одного елемента залишається ще працездатною, але вже при двох несправних елементах перестає правильно функціювати (значення двох сигналів на входах ВО дорівнює 1 і двох – 0, більшості немає). В той же час в структурі ще залишається два повністю працездатних елемента, а сама структура вже непрацездатна (!). Із цієї точки зору принцип більшості не є найкращим.

Інший алгоритм, що позбавлений вказаного недоліку, полягає в наступному: елемент, вихідна реакція якого відрізняється від реакцій інших елементів, відключається і в подальшому не приймає участі в утворенні результичного сигналу. Така своєрідна “ампутація” дозволяє зберегти працездатність структури аж до моменту, поки хоча б два елементи структури залишаються працездатним. Може виникнути питання, чому саме два, а не один. Справа в тому, що в ситуації, коли залишилося останніх два елементи і виходить з ладу передостанній, неможливо впевнено віддати перевагу одному з них і тим самим утворити правильний результичний сигнал.

Зрозуміло, що реалізація такого алгоритму більш складна, ніж мажоритарного. Це вже має бути не комбінаційна схема, а автомат із пам'яттю, проте його реалізація сучасними засобами мікроелектроніки не викликає жодних проблем.