

ЛЕКЦІЯ 6. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ. МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ВІДМОВ

6.1 Система показників надійності

6.2 Визначення моделі відмов і моделі надійності

6.3 Нормальний закон розподілу випадкових величин

6.4 Експоненціальний закон розподілу випадкових величин

6.5 Закон розподілу Вейбулла

6.1 Система показників надійності

Надійність – це комплексна властивість, яка залежно від призначення об'єкта та умов його експлуатації складається з *безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збережуваності* (рис. 1).

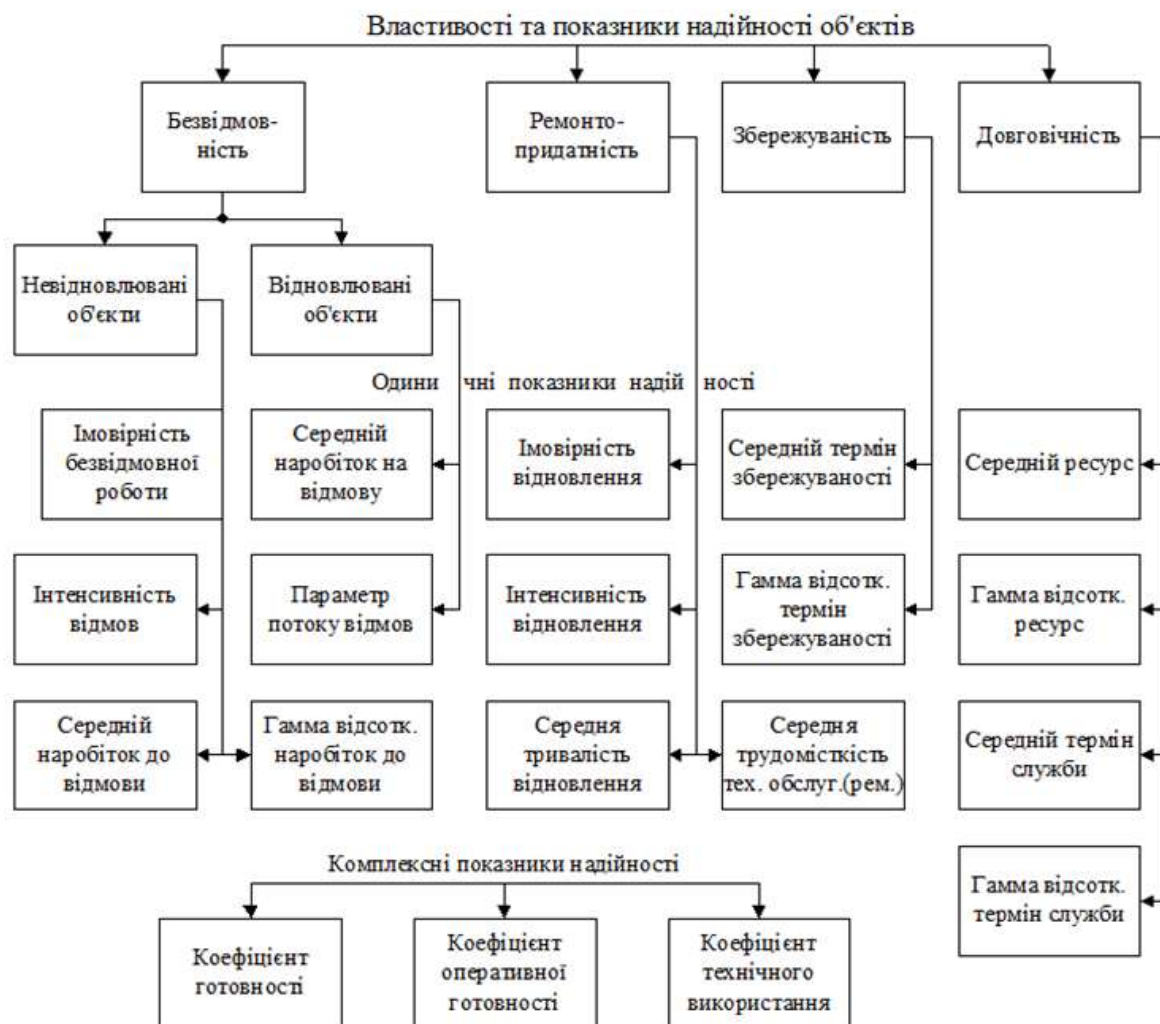


Рис. 1. Властивості та показники надійності об'єктів

Безвідмовність – властивість машини зберігати працездатність упродовж деякого часу або напрацювання (наприклад, до першої відмови).

Напрацювання – це тривалість або обсяг роботи машини і може визначатися кілометрами пробігу, годинами, тонами, кубічними метрами та іншими показниками. В основному безвідмовність розглядають стосовно використання машини за призначенням.

Довговічність – властивість машини зберігати працездатність до *граничного стану* в умовах установленної системи технічного обслуговування та ремонту.

Ремонтпридатність – властивість машини, що характеризує *пристосованість* її до виявлення причин відмови, зручності виконання технічного обслуговування та ремонту. Кількісно *ремонтпридатність* визначають за тратами часу, праці та засобів. До найпростіших властивостей, які визначають ремонтпридатність машини, належать доступність і можливість проведення легкого демонтажу складальних одиниць та деталей, взаємозамінюваність, ступінь уніфікації та ін.

Невідновлюваний виріб - виріб, який не може бути відновлений споживачем і підлягає заміні.

Відновлюваний виріб - виріб, який може бути відновлений споживачем.

Ремонтований об'єкт - об'єкт, ремонт якого можливий і передбачений нормативно-технічною, ремонтною і (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Об'єкт, що не ремонтується - об'єкт, ремонт якого неможливий або непередбачений нормативно-технічною, ремонтною і (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Збережуваність – властивість машини *зберігати працездатність* під час її транспортування та зберігання і в подальшому під час роботи. Збережуваність характеризується *опірністю* конструкції зміні характеристик елементів машини під дією вологи, атмосферного тиску, опромінення, навколишньої температури та власної маси при зберіганні. Високі показники збережуваності досягають за рахунок герметизації та встановлення спеціальних заглушок, пробок, застосування спеціальних лакофарбових покриттів, установлення спеціальних пристроїв.

У кожному конкретному випадку оцінки або завдання надійності виробу слід користуватися тими сторонами і видами надійності, які потрібні для характеристик надійності об'єкту з урахуванням його цільового призначення.

У прикладній теорії надійності в поняття надійності можуть включатися додаткові властивості. Так, для характеристики надійності об'єктів, що є потенційним джерелом небезпеки, використовуються властивості безпеки і живучості.

Безпека - властивість у разі порушення працездатного стану не створювати загрозу для життя і здоров'я людей, а також для довкілля.

Живучість - властивість об'єкту зберігати працездатність (повністю або частково) в умовах несприятливих дій, непередбачених нормальними умовами експлуатації.

Надійність може бути категорією якості, яку має машина, або *якістю* (в одних випадках машина надійна, в інших – не забезпечує необхідної надійності). Але якість підлягає зміні з часом, тобто машина може перейти з надійного стану в ненадійний. Цей процес не є випадковим, він закономірний і є наслідком поступових кількісних змін у машині.

Рівень надійності машин характеризується кількісними показниками. Це ймовірнісні характеристики.

Для характеристики надійності застосовують показники, що характеризують окремі її властивості – це *кількісні показники*, і декілька властивостей – *комплексні показники*.

Одиничні показники – це показники *безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережуваності*. Кількісні показники надійності – це показники, які належать до однієї з властивостей, що складають надійність машини.

Комплексні показники надійності, на відміну від одиничних, характеризують одночасно кілька властивостей машини.

Показники безвідмовності

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – імовірність того, що в заданому діапазоні часу t не відбудеться відмови машини:

$$P(t) = \frac{N_p}{N}, \quad (1)$$

де N_p – кількість працездатних машин ($N_p = N - n$); N – загальна кількість машин; n – кількість відмов.

Напрацювання до відмови – тривалість роботи машини до першої відмови.

Середнє напрацювання до відмови

$$t_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (2)$$

де t_i – час роботи до відмови i -ї машини.

Гамма-відсоткове напрацювання до відмови – це напрацювання, упродовж якого не відбудеться відмови машини з імовірністю γ . Його розраховують у відсотках, %.

Щільність розподілу відмов

$$f(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t} \quad (3)$$

де $n(t)$ – кількість відмов машини за час Δt ; Δt – інтервал часу;

N_0 – початкова кількість машин.

Інтенсивність відмов – це умовна щільність імовірності появи відмови

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_p \cdot \Delta t} \quad (4)$$

де N_p – кількість працездатних машин
або

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (5)$$

Практично для всіх систем інтенсивність відмов залежить від часу і має характеристику у вигляді “ванни” (рис. 2).

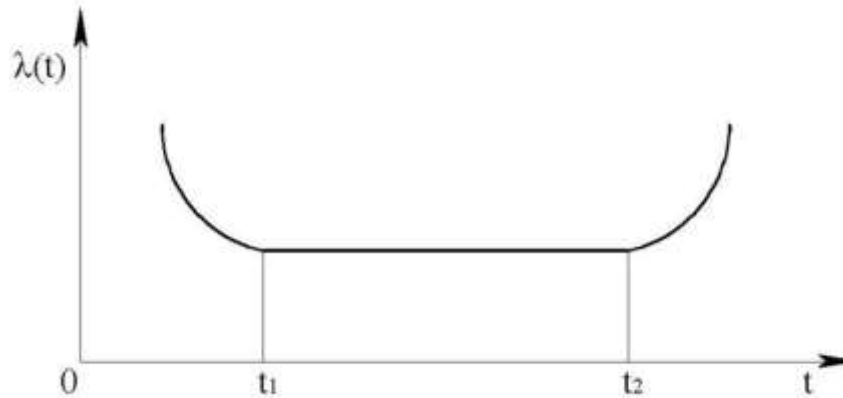


Рис. 2. Зміна інтенсивності відмов машини:

0– t_1 – період припрацювання;

t_1 – t_2 – період нормальної експлуатації;

$t > t_2$ – період зношування та старіння

Зміна $\lambda(t)$ за часом має три характерні ділянки.

Ділянка 0– t_1 – це період *припрацювання* машини, коли інтенсивність відмови зменшується. У цей період виявляються конструктивні, технологічні й виробничі дефекти. Закон розподілу відмов для різних машин може бути різним, але загальним є зменшення інтенсивності відмов до деякого постійного значення упродовж короткого проміжку часу.

Для забезпечення надійності машини під час її припрацювання необхідно розробити методи усування відмов. Для усування відмов після складання машини необхідно провести її *обкатку* на стенді або в реальних умовах. Під час обкатки проводиться заміна елементів, які відмовили, з'ясовуються причини їх відмови.

Показниками якості припрацювання можуть бути ККД, рівень шуму, температура поверхонь деталей, рідини та ін. Про закінчення процесу припрацювання показує незмінність показника $\lambda(t)$.

На ділянці t_1 – t_2 (це період *нормальної експлуатації*) інтенсивність відмов стає приблизно постійною ($\lambda(t) \approx \text{const}$) і визначається випадковими факторами.

З моменту $t > t_2$ інтенсивність відмов *збільшується* внаслідок процесів старіння і зміни хіміко-фізичних властивостей елементів машини, пов'язаних

з її довготривалою експлуатацією. Механізм відмов на цій ділянці пояснюється моделями зношування, старіння і утомлюваності.

Параметр потоку відмов – це відношення середньої кількості відмов відновлюваних машин до їх сумарного напрацювання:

$$\omega(t) = \frac{n}{\Sigma t_i}. \quad (6)$$

Показники довговічності

Ці показники оцінюють втрату працездатності за весь період експлуатації машини, тобто до появи її граничного стану.

Середній ресурс – напрацювання машини від початку експлуатації до граничного стану в годинах.

Ресурс – це запас можливостей роботи машини. Для неремонтованих виробів він збігається з напрацюванням до відмови, для ремонтваних – включає і тривалість роботи після ремонту до граничного стану:

$$T_{p.сер} = R_{сер} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N R_i \quad (7)$$

де R_i – ресурс i -ї машини;

N – кількість машин.

Гамма-відсотковий ресурс – напрацювання, упродовж якого машина не досягне граничного стану. Виражають його у відсотках.

Середній термін служби – середнє календарне напрацювання машини до граничного стану в роках:

$$T_{сл.сер} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N T_{сл.i} \quad (8)$$

де $T_{сл.i}$ – термін служби i -ї машини.

Таким чином, термін служби від ресурсу відрізняється лише розмірністю.

Показники ремонтпридатності

Імовірність відновлення – імовірність того, що час відновлення машини не перебільшить заданого (аналогія з імовірністю відмов).

Середній час відновлення, год:

$$T_{від.сер} = \frac{\sum t_{від.i}}{N} \quad (9)$$

де $t_{від.i}$ – час відновлення i -ї машини; N – кількість машин.

Показники збережуваності

Середній термін збережуваності

$$T_{зб.сер} = \frac{\sum t_{зб.i}}{N}, \quad (10)$$

де $t_{зб.i}$ – період збережуваності i -ї машини;

N – кількість машин.

Гамма-відсотковий термін збережуваності – термін збережуваності із заданою імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Комплексні показники надійності

Комплексні показники надійності, на відміну від одиничних, характеризують одночасно кілька властивостей машини.

Коефіцієнт готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається.

$$K_{\Gamma} = \frac{T_B}{T_B + T_{\text{від}}} \quad (11)$$

де T_B – напрацювання на відмову;

$T_{\text{від}}$ – середній період відновлення.

При визначенні коефіцієнта K_{Γ} період простоїв у технічному обслуговуванні, ремонтах та з організаційних причин не враховується.

Коефіцієнт технічного використання – відношення математичного сподівання часу перебування об'єкта в працездатному стані за певний період експлуатації до суми математичних сподівань часу перебування об'єкта в працездатному стані; часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонту за той же період експлуатації.

Характеризує фактичний термін роботи машини:

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{T_o}{T_o + T_{\text{від}} + T_{\text{ТО}}} \quad (12)$$

де T_o – період працездатного стану;

$T_{\text{від}}$ – період відновлення;

$T_{\text{ТО}}$ – період технічного обслуговування.

Коефіцієнт технічного використання – узагальнений комплексний показник надійності і є ширшою характеристикою працездатності ніж коефіцієнт готовності, оскільки враховує всі простої, пов'язані з технічним обслуговуванням і ремонтом об'єкта.

Коефіцієнт оперативної готовності – ймовірність того, що об'єкт, перебуваючи у режимі очікування, буде працездатним у довільний момент часу, і, починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

Режим очікування – це перебування об'єкта при повному або полегшеному навантаженні без виконання основних (робочих) функцій. При цьому можливо виникнення відмов, які повинні бути усунені з відновленням працездатності об'єкта для виконання необхідного завдання. Потрібно також, щоб у разі необхідності об'єкт був працездатним.

Цей коефіцієнт характеризує надійність техніки, призначеної для збирання врожаю, обладнання переробних виробництв, кормоприготувальних машин та ін.

До показників, які враховують сумарну і питому сумарну трудомісткість (вартість) технічного обслуговування і ремонту, і є **комплексними показниками надійності**, належать такі:

– середня сумарна трудомісткість технічного обслуговування – математичне сподівання сумарних затрат праці на проведення технічного обслуговування за певний період експлуатації;

– середня сумарна трудомісткість ремонту – математичне сподівання сумарних затрат праці на всі види ремонту об'єктів за певний період експлуатації;

– середня сумарна вартість технічного обслуговування (ремонту) – математичне сподівання сумарних витрат на проведення технічного обслуговування (на всі види ремонту) об'єкта за певний період експлуатації.

Для цих показників (разом з їх середніми значеннями) застосовують питомі величини, які визначають як відношення середніх сумарних величин до відповідного математичного сподівання сумарного напруцювання об'єкта за певний період експлуатації.

Важливими показниками є **коефіцієнт відновлення** і **коефіцієнт відновлення ресурсу**.

Показники експлуатаційної технологічності характеризують затрати праці, а також кошти на підготовку машин до експлуатації, на планові технічні обслуговування в процесі експлуатації, на роботи після експлуатації.

Показники ремонтної технологічності характеризують пристосованість конструкції об'єкта та його складових (деталей, складальних одиниць та ін.) до ремонтних робіт, які виконуються для відновлення їх працездатності на ремонтних підприємствах.

До цих показників відносять: середній час ремонту; ймовірність його закінчення у заданий час; середні абсолютні витрати на ремонт техніки певного виду; відносні витрати, віднесені до одиниці часу перебування машини в експлуатації (для деталей, складальних одиниць та ін.) або до одиниці виробленої продукції (машин та ін.). Додаткові показники ремонтпридатності у сполученні з основними дозволяють конкретизувати окремі вимоги до ремонтпридатності.

Показники, які характеризують загальну технічну досконалість конструкції машини, у тому числі й конструктивні рішення:

Коефіцієнт застосовності конструктивних елементів – відношення суми кількості найменувань типорозмірів стандартизованих, нормалізованих, запозичених та придбаних деталей та вузлів до загальної кількості найменувань конструктивних елементів об'єкта.

Коефіцієнт уніфікації визначає, яку частину використаних деталей об'єкта уніфіковано.

Коефіцієнт конструктивної послідовності – відношення кількості найменувань раніше освоєних складальних одиниць і деталей до загальної кількості найменувань конструктивних елементів об'єктів.

Послідовність значно спрощує організацію й технологію виготовлення машин і дає змогу раціональніше вирішувати питання їх експлуатації і ремонту.

Перераховані коефіцієнти належать до найважливіших показників стандартизації:

Коефіцієнт взаємозамінності – відношення кількості взаємозамінних елементів до загальної кількості конструктивних елементів машин. Раціональний рівень взаємозамінності конструктивних елементів у машині – важливий засіб зниження затрат праці й коштів при усуненні відмов.

Коефіцієнт кратності обслуговування та термінів служби конструктивних елементів – відношення відповідної кількості елементів машин періодичності обслуговувань і ремонту базового конструктивного елемента до загальної кількості найменувань конструктивних елементів. Дотримання вимог і кратності або рівної періодичності й строків служби елементів машини значно скорочує сумарний час простою машини та витрати на її обслуговування і ремонт.

Коефіцієнт загальної контролепридатності – відношення кількості конструктивних елементів, пристосованих до контролю різними способами технічного стану машини в процесі експлуатації, до загальної кількості елементів машини, контроль яких необхідний під час експлуатації.

Показники, які характеризують пристосованість конструкції машини до профілактичних і відновлюваних робіт:

Коефіцієнт зручності поз – відношення загальної кількості зручних поз при виконанні робіт до загальної кількості можливих поз.

Коефіцієнт доступності враховує сумарну трудомісткість баластних робіт (підготовка машини, необхідні розбірно-складальні роботи тощо), які необхідно виконати при усуненні відмов і технічному обслуговуванні.

6.2 Визначення моделі відмов і моделі надійності

В процесі експлуатації техніки події, які визначають перехід виробу в різні технічні стани, відбувається випадковим чином. Інтервал часу перебування виробу у певному стані має випадкову тривалість; це: напрацювання до відмови, напрацювання між відмовами, напрацювання до критичної відмови, ресурс, термін служби, термін зберігання, час відновлення. Всі випадкові тривалості є неперервними і вимірюються в одиницях часу, звичайно – в годинах або в одиницях, пропорційних часу (кількість циклів, запусків, обертів і т.п.).

Вичерпною характеристикою будь-якої випадкової величини, у тому числі і випадкових тривалостей t , є ймовірнісний розподіл цієї випадкової величини або функція розподілу. Незалежно від складності кожен виріб (елемент, функціональна система, складна система з резервуванням) має свою функцію розподілу напрацювання $F(t)$. Оскільки значення, яке має випадкова величина t , визначає на осі часу момент появи відмови, то функцію розподілу $F(t)$ називають *моделлю розподілу відмов або моделлю відмов*.

Модель відмов – математична модель у вигляді функції розподілу відмов або ймовірності появи відмов в заданий момент часу (функція розподілу напрацювання до відмови).

Модель відмов однозначно пов'язана з функцією безвідмовності $R(t)$, яка має назву *моделі надійності*, їй дається наступне визначення.

Модель надійності – математична модель, яка встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкта, характеристиками надійності елементів його структури та параметрами процесу функціонування об'єкта.

Таким чином, побудова моделі надійності, тобто розрахунок ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ як функції напрацювання, передбачає визначення аналітичного виразу для щільності розподілу напрацювання до відмови $f(t)$, враховуючи, що застосування тієї чи іншої теоретичної моделі відмов обумовлює певну точність обчислюваних кількісних показників надійності.

Аналітичний вираз для щільності розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ (або функції розподілу $F(t)$) можна отримати двома принципово різними способами:

1) на підставі аналізу статистичних даних з напрацювання до відмови (ресурсу, терміну безвідмовного зберігання тощо);

2) на підставі аналізу фізичних процесів деградації в елементах виробу, які призводять до відмови (граничного стану).

Перший спосіб встановлення закономірностей виникнення відмов полягає у залученні (використанні) деяких розподілів випадкових величин, відомих з теорії ймовірностей (експоненціальний, логарифмічно нормальний і деякі інші розподіли), як моделі відмов. Причому, відмову розглядають як відвернену випадкову подію, а моделі відмов вважають *строго ймовірнісними*.

Другий спосіб для встановлення закономірностей виникнення відмов ґрунтується на результатах аналізу закономірностей перебігу фізичних процесів, які призводять до відмов. Причому, фізичні процеси деградації розглядають як випадкові. Практичне застосування такого підходу дають моделі відмов, які адекватно відображають фізичні процеси деградації в елементах техніки, параметри одержаного розподілу напрацювання до відмови мають конкретну фізичну інтерпретацію. Такі моделі відмов називають *ймовірнісно-фізичними*.

Вимоги до моделей відмов

Повний життєвий цикл кожного виробу авіаційної техніки супроводжується вирішенням комплексу задач з оцінювання його надійності: розрахунок показників надійності на ранніх етапах проектування, підтвердження досягнутого (заданого) рівня надійності експериментальними методами на кінцевих етапах проектування і виробництва, визначення норм кількості запасних виробів для забезпечення надійності під час експлуатації, оптимізація параметрів системи ТО і Р.

Розв'язання зазначених задач передбачає використання тієї чи іншої моделі відмов, яке забезпечує, по-перше, вирішення цих задач і, по-друге, збіжність результатів розрахункових і експериментальних оцінок.

Функція розподілу, яка використовується як модель відмов, повинна дозволити вирішувати такі основні задачі теорії надійності:

– розрахунок показників безвідмовності невідновлюваних (резервованих і нерезервованих) систем, наприклад, середнього і гамма-відсоткового напрацювання до відмови, ймовірності безвідмовної роботи, залишкового ресурсу;

– розрахунок показників безвідмовності відновлюваних (резервованих і нерезервованих) систем, наприклад, середньої кількості відмов, параметра потоку відмов, середнього напрацювання на відмову на будь-якому інтервалі часу і на будь-який момент експлуатації функціональної системи;

– прогнозування довговічності при проектуванні (оцінки середнього та гамма-відсоткового ресурсу або терміну служби), а також при експлуатації (оцінки середнього й гамма-відсоткового залишкових ресурсів) виробів та систем;

– розрахунок комплексних показників надійності (наприклад, коефіцієнтів готовності до вильоту);

– розрахунок показників ефективності (наприклад, ймовірності відновлення справності в заданий час, середньої тривалості обслуговування) системи ТО і Р;

– планування визначальних і контрольних випробувань виробів на надійність;

– розрахунок норм запасних елементів і виробів;

– обробку й одержання оцінок (точкових та інтервальних) показників надійності за даними експлуатації.

Виходячи з кінцевої мети – вирішення задач надійності, обґрунтуємо критерії, яким повинні задовольняти різні моделі розподілу відмов в інтервалі часу, обумовленому ресурсом або терміном служби виробу чи системи. Ці критерії необхідні також для порівняльного аналізу різних моделей відмов і оцінки можливості застосування їх в розрахунках показників надійності. Відповідно до рекомендацій нормативних документів такими критеріями вважаємо: фізичність, адекватність, можливість виконання розрахунків надійності системи, універсальність та практичну придатність. Розглянемо зміст цих критеріїв.

1. *Фізичність*. Під час випробувань функціональних систем ПС, спроектованих на сучасній високонадійній елементній базі, не завжди вдається зібрати необхідний обсяг статистики з відмов виробів і систем. За цих умов основним критерієм вибору моделі відмов є фізичне обґрунтування (фізичність) моделі відмов, застосованої для розрахунків надійності. Важливо, наскільки ця модель враховує причинно-наслідкові зв'язки і механізми відмов, а також динаміку процесів деградації, які призводять до виникнення відмов, умови навантаження та іншу апіорну інформацію, зокрема, чинники, побічно пов'язані з формуванням відмови. Але, навіть за наявності достатньої статистичної інформації з відмов, яка забезпечує вибір моделі, фізичне обґрунтування залишається важливим критерієм для визначення остаточного рішення.

2. *Адекватність*. Важливою властивістю функції розподілу, застосованої як модель відмови, є її здатність з достатньою точністю описувати різні форми розподілів у практично значущому діапазоні значень коефіцієнтів варіації, асиметрії та ексцесу. Використання більш адекватних моделей дозволяє точніше оцінити показники надійності як розрахункові, так і експериментальні. Крім того, уточнення оцінок показників надійності скорочує тривалість випробувань, обсяг необхідної статистичної інформації про надійність,

а також зменшує витрати. Слід віддавати перевагу моделі відмов, яка найбільш точно описує “хвост” розподілу – початок кривої і її асимптотичну частину.

3. *Можливість виконання розрахунків надійності систем.* Найбільш важливою задачею надійності, яку розв'язують, використовуючи моделі відмов, є розрахунок і прогнозування надійності при проектуванні і модернізації виробів та систем авіаційної техніки. Тому надзвичайно важливою властивістю функції розподілу, яка використовується як модель відмов, слід вважати можливість виконання розрахунку надійності на її основі. Зазначимо, що розрахунок безвідмовності відновлюваних систем може бути виконано тільки на основі функції розподілу, яка має властивість згортки розподілів. З відомих розподілів, які використовують в розрахунках надійності, тільки функції експоненціального, нормального та DN -розподілів мають цю властивість.

4. *Універсальність.* Різноманітність розв'язуваних задач (кількість оцінюваних показників надійності і методи їхнього визначення) вимагає універсальності прийнятої моделі відмов. З метою забезпечення збіжності результатів розрахункових і експериментальних оцінок надійності виробів функція розподілу, яка використовується як теоретична модель відмов, повинна дозволяти вирішувати всі необхідні задачі надійності.

5. *Практична придатність.* В інженерній практиці важливою є простота аналітичних виразів всіх необхідних характеристик розподілу, а також зручність їхнього застосування при розв'язуванні конкретних задач надійності. Цей критерій реалізується в моделях розподілу, які мають меншу кількість параметрів, а також в моделях, виражених відомими і табульованими функціями.

Розглянемо характеристики, властивості та можливості моделей розподілу відмов, які застосовуються в теорії надійності.

6.3 Нормальний закон розподілу випадкових величин

Основні характеристики нормального розподілу

Одним із найбільш універсальних, зручних і широко застосовуваних для практичних розрахунків законів розподілу випадкових величин є закон розподілу Гаусса (рис.3). Універсальність цього закону полягає в тому, що його вважають граничним законом, з якого випливають інші (показниковий, Релея, Вейбулла, Пуассона, біноміальний тощо).

Нормальний розподіл проявляється тоді, коли зміна випадкової величини зумовлена багатьма причинами рівнозначного впливу. Йому підпорядковуються напрацювання до відмови і на відмову більшості відновлюваних і невідновлюваних виробів, які спрацьовуються і кородують, похибки вимірювань тощо.

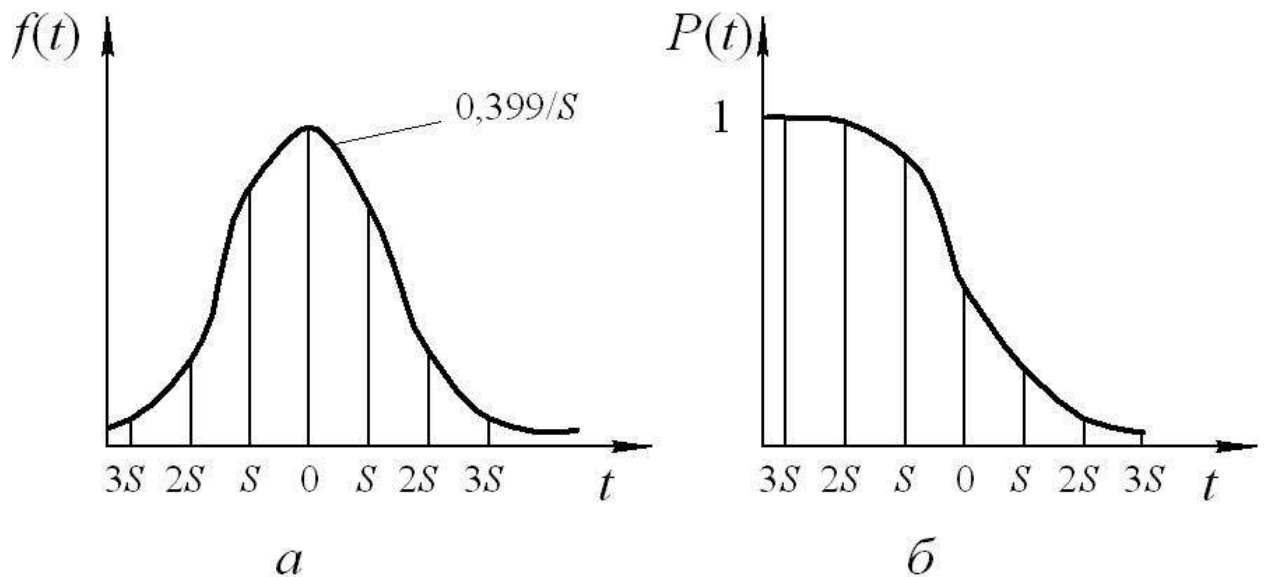


Рис.3. Щільність ймовірності (а) та інтегральна функція ймовірності (б) нормального розподілу

Функцію щільності розподілу розраховують за формулою:

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2S_t^2}} \quad (13)$$

Цей розподіл має два незалежних параметри: математичне сподівання m_t і середнє квадратичне відхилення S . Значення цих параметрів оцінюють за такими формулами:

$$m_t \approx \bar{t} = \sum t_i / N; \quad (14)$$

$$S \cong s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}, \quad (15)$$

де $\bar{t}$, S – статистичні оцінки відповідно математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення (наприклад, часу напрацювання об'єкта до відмови або на відмову).

Математичне сподівання в цьому законі розподілу визначає положення центра кривої на осі абсцис, а середнє квадратичне відхилення – ширину фігури, описаної цією кривою (рис. 3, а). При деякому напрацювання t ймовірність відмови $Q(t)=F(t)$ наближається до 1,0, а ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ падає до нуля (рис. 3, б).

Крива щільності розподілу випадкової величини тим гостріша і вища, чим менше значення S (рис. 4). Вона поширюється в межах значень аргументу t від $-\infty$ до $+\infty$. Це не дуже вагомий її недолік, оскільки площа, окреслена кінцями кривої, що прямують до нескінченності, відображає дуже малу ймовірність відмови об'єкта. Так, ймовірність відмови за період до $m_t - 3S$ становить лише 0,135 % і може не враховуватись у розрахунках.

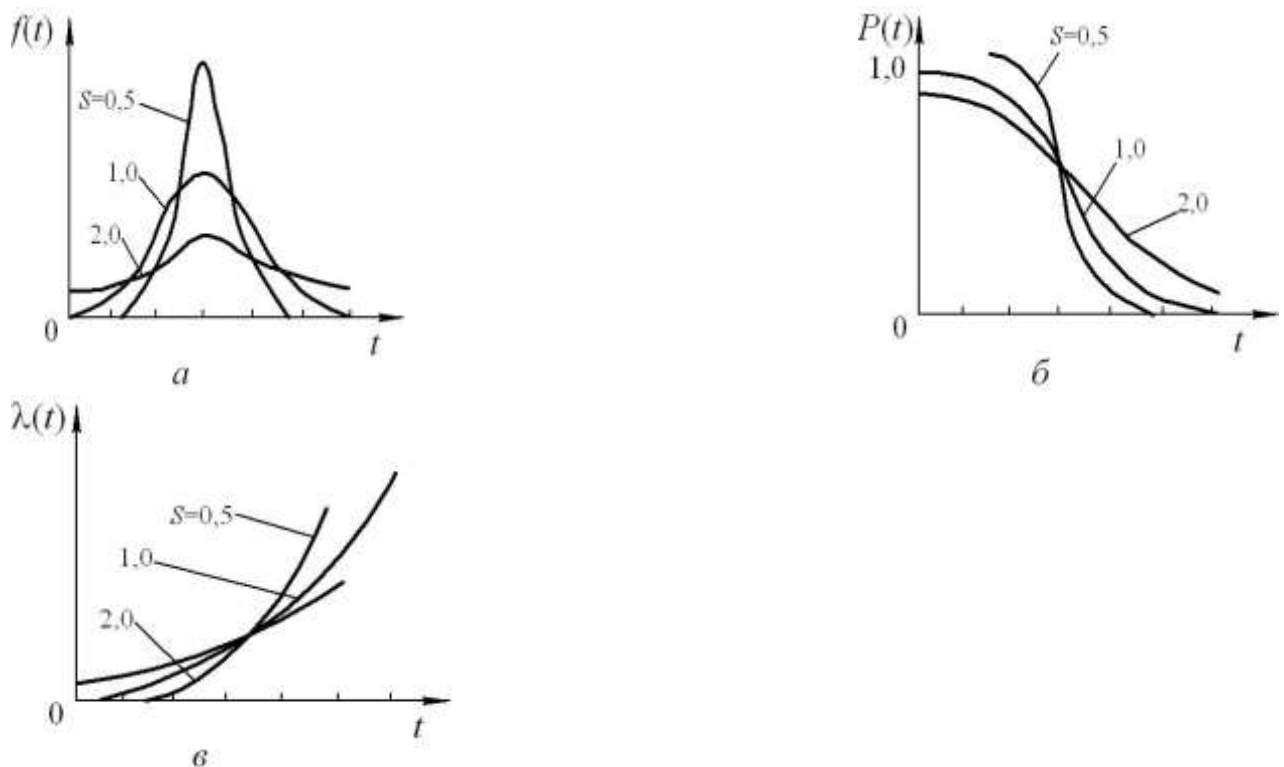


Рис. 4. Основні характеристики нормального розподілу за різних значень середнього квадратичного відхилення:
 a – щільність ймовірності $f(t)$; $б$ – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$;
 $в$ – інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Для періоду $m_t - 2S$ ймовірність відмови також низька і не перевищує 2,175 %. Найбільша ордината кривої щільності розподілу дорівнює $0,399/S$.

Інтегральна функція розподілу $F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$.

Ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи становить відповідно: $Q(t)=F(t)$; $P(t)=1 - F(t)$.

Вирахування інтегралів замінюють застосуванням таблиць, а для спрощення користуються невеликими таблицями для нормального розподілу, який має $m_x=0$; $S_x=1$.

Функція щільності ймовірності для цього розподілу

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \text{ і залежить лише від однієї змінної } x \text{ (рис. 5).}$$

Величина x є центрованою, оскільки $m_x=0$, і нормованою, адже $S_x=1$.

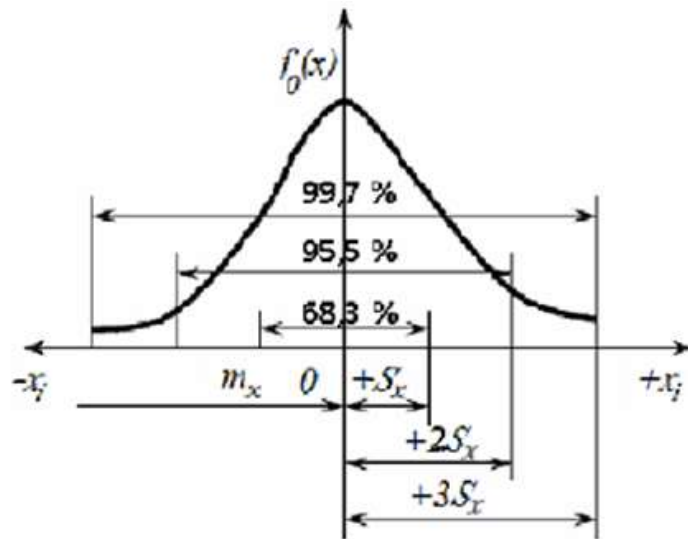


Рис. 5. Диференціальна функція нормованого нормального розподілу випадкової величини

У цьому разі інтегральну функцію описують формулою:

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^x f_0(x) dx \quad (16)$$

Очевидно, що

$$F_0(x) + F_0(-x) = 1; \quad (17)$$

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x) \quad (18)$$

Для використання таблиць потрібно робити підстановку $x = (t - m_t)/S$. При цьому x називається квантилем нормованого нормального розподілу і позначається U_p .

Щільність розподілу, ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи відповідно визначають так:

$$f(t) = \frac{f_0(x)}{S}; \quad Q(t) = F_0(x); \quad P(t) = 1 - F_0(x) \quad (19)$$

Значення $f_0(x)$ і $F_0(x)$ беруть із таблиць (наприклад, табл. 1).

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку показників надійності

x	0	1	2	3	4
$f_0(x)$	0,3989	0,2420	0,0540	0,0044	0,0001
$F_0(x)$	0,5	0,8413	0,9772	0,9986	0,9999

В інших таблицях наведено безпосередньо значення $P(t)$ залежно від квантиля:

$$x = U_p = (t - m_t)/S. \quad (20)$$

Ймовірність безвідмовної роботи – це ймовірність того, що у межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникає.

Ймовірність безвідмовної роботи застосовується як кількісний критерій надійності об'єктів для відновлених та невідновлених об'єктів.

Для режимів зберігання та транспортування використовується аналогічний термін – "ймовірність невиникнення відмови". Ймовірність безвідмов-

ної роботи визначається у частках одиниці або у відсотках і змінюється від одиниці до нуля. Наприклад (рис. 6), до напрацювання t_1 ймовірність безвідмовної роботи дорівнює 1, а при напрацюванні t_4 – 0,1.

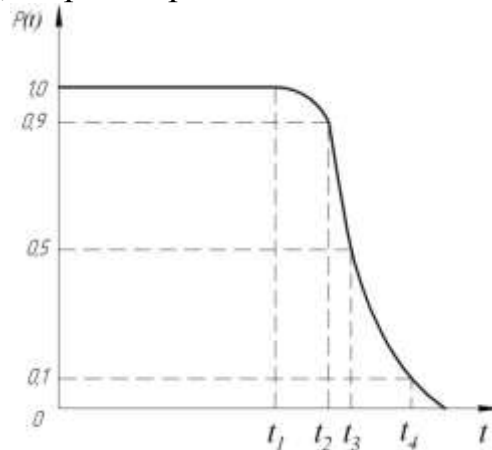


Рис. 6. Функція ймовірності безвідмовної роботи залежно від напрацювання об'єкта

Ймовірність безвідмовної роботи являє собою безумовну ймовірність того, що в інтервалі від 0 до t відмови не буде, і визначається за формулою:

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (21)$$

де $F(t)$ – функція розподілу напрацювання до відмови.

Ймовірність безвідмовної роботи – безрозмірний показник, при його призначенні або визначенні необхідно вказувати час t або напрацювання, протягом якого його значення повинно бути не нижче наведеної величини.

Аналітичний, вираз для визначення $P(t)$:

$$P(t_0) = 1 - F_0\left(\frac{\bar{T} - t_0}{\sigma}\right), \quad (22)$$

де $\bar{T}$ – середнє арифметичне значення напрацювання;

t_0 – задане значення напрацювання.

Ймовірність безвідмовної роботи за статистичними даними про відмови оцінюється виразом:

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (23)$$

де $\hat{P}(t)$ – статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи;

N_0 – кількість об'єктів на початку випробування;

$n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили протягом певного часу.

При великій кількості об'єктів N_0 статистична оцінка практично збігається з ймовірністю безвідмовної роботи $P(t)$: $P(t) = \lim_{n \rightarrow N_0} \hat{P}(t)$.

На практиці в деяких випадках зручніше користуватись характеристикою ймовірності відмови.

Ймовірність відмови – ймовірність того, що за певних умов експлуатації у заданому інтервалі часу або у межах заданого напрацювання виникає хоча б одна відмова.

Ймовірність відмови $Q(t)$ при $t = 0$ дорівнює 0, змінюється від 0 до 1 і обчислюється за формулою:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (24)$$

Для статистичного визначення ймовірності відмови користуються формулою:

$$Q(t) = 1 - \left(1 - \frac{n(t)}{N_0} \right) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (25)$$

де $n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили за час t .

Гамма-відсотковий ресурс t_γ – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану із заданою ймовірністю γ відсотків.

Гамма-відсотковий ресурс має велике практичне значення, оскільки в результаті неминучого розсіювання довговічності сільськогосподарської техніки при навантаженнях в умовах експлуатації, що змінюються, їх довговічність – величина статистична. Визначається експериментально за даними про довговічність великої групи об'єктів.

Гамма-відсотковий ресурс має і перевищує у середньому обумовлену кількість γ відсотків виробів даного типу.

Заданий відсоток об'єктів γ – регламентована ймовірність. Наприклад при $\gamma = 90\%$, відповідний ресурс називають 90%-вим ресурсом. На рис. 7 - 90%-вий ресурс відповідає t_2 .

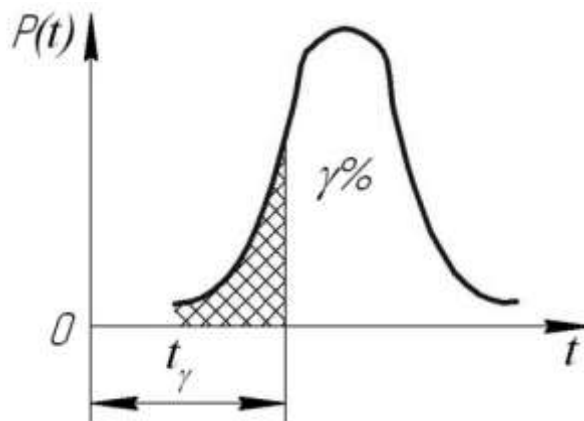


Рис. 7. Гамма-відсотковий ресурс при роботі об'єктів

Якщо ресурс виробів має розподіл зі щільністю ймовірності $f(t)$, то гамма-відсотковий ресурс t_γ обчислюють за рівнянням:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (26)$$

Якщо $\gamma = 50\%$, то це медіанний (середній) ресурс t_{me} (рис.7, де $t_{me} = t$).

У випадку розподілу Вейбулла-Гнеденка рівняння (26) приймає вигляд:

$$\exp\left[-\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b\right] = \frac{\gamma}{100}.$$

Логарифмуючи це рівняння, отримують:

$$\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b = -\ln \frac{\gamma}{100},$$

звідки

$$t_\gamma = t_0^b \sqrt[b]{-\ln \frac{\gamma}{100}}. \quad (27)$$

Для експоненціального розподілу при $t_0 = \bar{t}$ і $b=1$ застосовують рівняння:

$$t_\gamma = t_0 \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right) = \bar{t} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right). \quad (28)$$

Якщо, наприклад, $\gamma = 90\%$, то за рівнянням (11) $t_{90} = 0,105\bar{t}$.

Частина об'єктів (рис. 7), які вичерпали свій ресурс до певного напрацювання, визначається заштрихованою частиною площі під кривою до ординати даного напрацювання (при цьому вся площа під кривою приймається за 100%).

Якщо спостереження (випробування) вести, поки всі 100% об'єктів вичерпають свій ресурс (досягнуть граничного стану) – до напрацювання $t_{\gamma=0}$ то за їх результатами нескладно визначити середній ресурс. Тривалість випробувань (спостережень) при цьому буде максимальною.

Наприклад, середній доремонтний ресурс t_{op} сільськогосподарських тракторів та їх агрегатів повинен досягати 6...8 тис. мото-год. При цьому довговічність окремих тракторів певної марки може значно перевищувати середній доремонтний ресурс. Це потребує для завершення випробувань (спостережень) в умовах експлуатації з вичерпуванням ресурсу всіх досліджуваних тракторів п'ять і більше років.

Гамма-відсотковий ресурс як показник оцінки довговічності сприяє скороченню часу випробувань (спостережень) машин, оскільки випробування (спостереження) приводять до вичерпування ресурсу порівняно невеликої кількості (10...20%) машин. При цьому значення гамма-відсоткового ресурсу відповідно рівні t_{γ_1} і t_{γ_2} ($\gamma_1 = 90\%$ та $\gamma_2 = 80\%$).

Чим більше встановлена γ , тим менше тривалість випробувань (спостережень). Проте для оцінки ресурсу з певною регламентованою точністю при зменшенні тривалості випробувань потрібно збільшити кількість об'єктів, що випробовуються.

За гамма-відсотковим ресурсом оцінюють якість нових і відремонтованих машин.

6.3 Експоненціальний закон розподілу випадкових величин

Основні характеристики експоненціального розподілу

Експоненціальний розподіл являє собою однопараметричну функцію, в якій щільність розподілу напрацювання до відмови виражена простою, відомою з теорії ймовірностей, аналітичною залежністю

$$f(t) = c \exp(-ct), \quad (29)$$

де c – параметр розподілу, який визначає положення кривої щільності розподілу на площині координат $f(t) - t$ і має розмірність $[\text{год}^{-1}]$.

Криві щільності розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ наведено на рис. 8.

Знайдемо аналітичні вирази для розрахунків показників надійності виробів з використанням даної моделі відмов. Згідно з (1) маємо

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - \int_0^t c \exp(-ct) dt = 1 + \int_0^t \exp(-ct) d(-ct) = \\ &= 1 + \exp(-ct) \Big|_0^t = 1 + \exp(-ct) - 1 = \exp(-ct). \end{aligned} \quad (30)$$

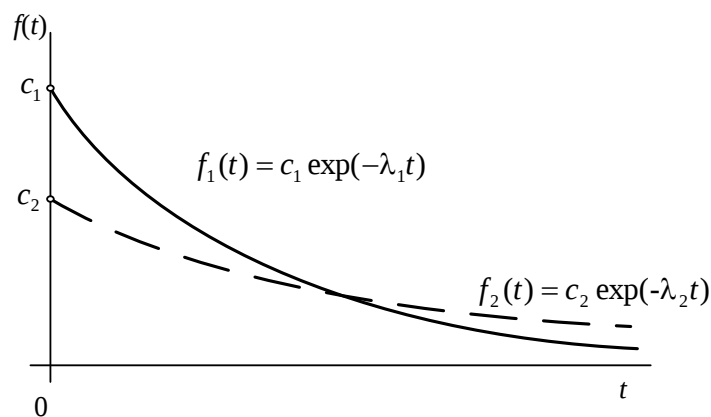


Рис. 8. Залежність $f(t)$ в експоненціальній моделі відмов

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи елементів, виробів та систем при використанні для розрахунків експоненціальної моделі відмов визначається досить простою аналітичною залежністю (30). Проте, в цій простій залежності параметр розподілу c поки що залишається невідомим. Визначимо його, використовуючи фундаментальне співвідношення теорії надійності, яке пов'язує інтенсивність відмов зі щільністю їхнього розподілу на осі напрацювання та ймовірністю безвідмовної роботи:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{c \exp(-ct)}{\exp(-ct)} = c = \text{const}. \quad (31)$$

Параметр c в експоненціальному розподілі чисельно дорівнює деякому константному значенню інтенсивності відмов розглянутих елементів, виробів чи систем, тобто експоненціальна модель описує відмову як явище, яке виникає зі сталою інтенсивністю $\lambda = c$, що, природно, обмежує область застосування моделі як з певними інтервалами напрацювання, так і для певних типів виробів.

З урахуванням (31) щільність розподілу напрацювання до відмови в експоненціальній моделі відмов

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (32)$$

Складемо розрахункові залежності для оцінювання безвідмовності на основі даної моделі відмов. Використовуючи (30), можна записати

$$R(t) = \exp(-\lambda t), \quad (33)$$

а ймовірність виникнення відмови за напрацювання t :

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

З урахуванням (33) середнє напрацювання до відмови:

$$T_o = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = -\frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) d(-\lambda t) = \frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t) \Big|_0^{\infty}. \quad (34)$$

Підставивши значення меж, остаточно отримаємо аналітичний зв'язок між параметром експоненціальної моделі – інтенсивністю відмов λ і середнім напрацюванням виробу до відмови:

$$T_o = \frac{1}{\lambda}. \quad (35)$$

Це співвідношення дозволяє знайти оцінку параметра розподілу λ . Для цього необхідно обчислити на основі статистичних даних $\{t_i\}$ оцінку першого початкового моменту α_1^* даного розподілу, вважаючи її такою, що дорівнює T_o . Оцінку параметра експоненціальної моделі відмов знайдемо за залежністю $\lambda^* = 1/\alpha_1^*$.

Істотним обмеженням для застосування експоненціального розподілу як моделі відмов є неможливість урахування розсіювання напрацювання виробу до відмови. Для цього запишемо аналітичний вираз для дисперсії напрацювання до відмови, що, за визначенням, є другим центральним моментом випадкової величини t :

$$\begin{aligned} D[t] &= \int_0^{\infty} (t - T_o)^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\lambda}\right)^2 \lambda \exp(-\lambda t) dt = \\ &= \lambda \left[\int_0^{\infty} t^2 \exp(-\lambda t) dt - \frac{2}{\lambda} \int_0^{\infty} t \exp(-\lambda t) dt + \frac{1}{\lambda^2} \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

Обчислимо перший інтеграл (у квадратних дужках (36)), застосувавши інтегрування вроздріб. Введемо позначення:

$$u = t^2; \quad du = 2t dt; \quad dv = \exp(-\lambda t) dt; \quad v = -\frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t).$$

Тоді

$$I_1 = \int_0^{\infty} t^2 \exp(-\lambda t) dt = uv \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} v du = -\frac{t^2}{\lambda} \exp(-\lambda t) \Big|_0^{\infty} + \frac{2}{\lambda} \int_0^{\infty} t \exp(-\lambda t) dt. \quad (37)$$

Перший доданок у цьому виразі при підстановці верхньої межі перетворюється на нуль, оскільки $\exp(\lambda t)$ збільшується швидше, ніж t^2 ; другий доданок скорочується з аналогічним виразом у (7) зі знаком „–“. Остаточно одержуємо:

$$\begin{aligned} D[t] &= \lambda \left[\frac{1}{\lambda^2} \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt \right] = -\frac{1}{\lambda^2} \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) d(-\lambda t) = \\ &= -\frac{1}{\lambda^2} [\exp(-\lambda t)]_0^{\infty} = -\frac{1}{\lambda^2} [0 - 1] = \frac{1}{\lambda^2}. \end{aligned} \quad (38)$$

Середнє квадратичне відхилення напрацювання до відмови від центра розсіювання T_0 : $\sigma = \sqrt{D[t]} = 1/\lambda$, тобто дорівнює значенню середнього напрацювання T_0 , внаслідок чого коефіцієнт варіації напрацювання до відмови в експоненціальній моделі відмов завжди дорівнює одиниці: $v = \sigma/T_0 = 1$.

Аналогічно можна показати, що фіксованим є не тільки другий, але також третій і четвертий моменти експоненціального розподілу (коефіцієнт асиметрії завжди дорівнює двом, коефіцієнт ексцесу – дев'яти). Це змушує дослідників користуватись тільки математичним сподіванням, тоді як показники безвідмовності істотно залежать від розсіювання (розкиду) напрацювання.

Особливість цієї моделі відмов обумовлена її простотою. Для цього знайдемо аналітичний вираз для параметра потоку відмов $\omega(t)$ і запишемо зображення за Лапасом щільності експоненціального розподілу напрацювання до відмови (32):

$$\bar{f}(s) = \frac{\lambda}{\lambda + s}. \quad (39)$$

Підставивши $\bar{f}(s)$ у вираз, одержимо зображення за Лапасом для параметра потоку відмов:

$$\bar{\omega}(s) = \frac{\lambda/(\lambda + s)}{1 - \lambda/(\lambda + s)} = \frac{\lambda}{s}.$$

Оригіналом цього зображення є

$$\omega(t) = \lambda = \text{const}. \quad (40)$$

Таким чином, в експоненціальній моделі відмов параметр потоку відмов не залежить від напрацювання і чисельно дорівнює значенню параметра розподілу (інтенсивності відмов). Через цей збіг показників деякі фахівці у своїх дослідженнях ототожнюють “інтенсивність відмов” (показник безвідмовнос-

ті невідновлюваних виробів) з “параметром потоку відмов” (показником безвідмовності відновлюваних виробів), не враховуючи того, що насправді емпіричні (реальні) характеристики цих показників мають зовсім різні закономірності у часі.

Рисунок 9 ілюструє співвіднесеність емпіричних залежностей інтенсивності відмов і параметра потоку відмов від напрацювання з теоретичними залежностями, які випливають із експоненціальної моделі відмов зі щільністю розподілу.

Ця ілюстрація наочно показує, що експоненціальний розподіл є досить „грубою“ моделлю розподілу відмов, що „вирівнює“ принципово різні показники – емпіричні $\lambda^*(t)$ і $\omega^*(t)$. Методика одержання статистичних даних для оцінювання інтенсивності відмов $\lambda^*(t)$ принципово відрізняється від умов одержання статистики відмов для оцінки параметра потоку відмов $\omega^*(t)$. Експоненціальна модель відмов „не дозволяє розрізнити“ середнє напрацювання до відмови T_0 (показник безвідмовності невідновлюваних систем) і середнє напрацювання на відмову T_1 (показник безвідмовності відновлюваних систем), оскільки:

$$T_1 = 1/\omega = 1/\lambda = T_0.$$

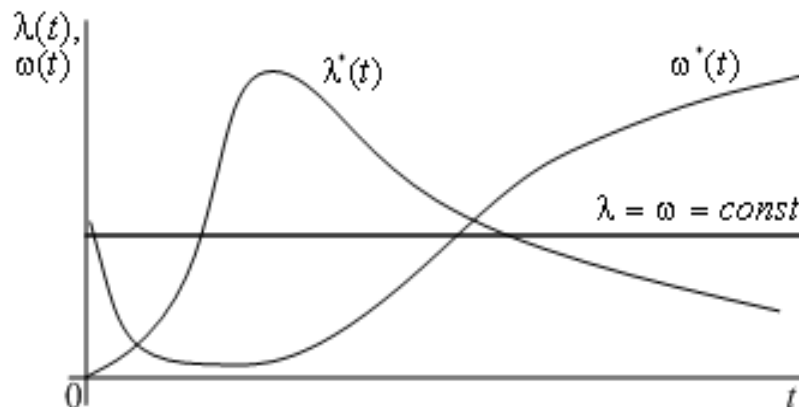


Рис. 9. Емпіричні залежності $\lambda^*(t)$ і $\omega^*(t)$ та параметр $\lambda = \omega$ експоненціальної моделі розподілу відмов

Експоненціальний розподіл був першою моделлю відмов, на основі якої розраховувалася безвідмовність елементів і технічних систем з самого початку появи теорії надійності як науки (середина XX ст.). Багато вчених і фахівців-практиків віддають перевагу цій моделі відмов завдяки її простоті, оскільки однопараметрична модель спрощує розв’язання задач надійності. Достатньо сказати, що всі оптимізаційні задачі у галузі надійності вирішувались з використанням тільки експоненціальної моделі. І модель виправдала своє призначення, адекватно відображаючи статистику відмов елементної бази, яку використовували в технічних системах у 1950-1970 роках. Це спричинило досить істотний зсув вправо (по осі напрацювання) середнього значення (математичного сподівання) статистичного напрацювання до відмови T_0 , внаслідок чого експоненціальний розподіл найчастіше не узгоджувався з реальною статистикою відмов.

Якісну динаміку (послідовне збільшення) середнього напрацювання до відмови з підвищенням надійності елементної бази наведено на рис. 10 у вигляді гістограм $f^*(t)$, які відповідають двадцятирічним періодам розвитку техніки і технологій. Практика змушує рахуватись з тим, що розподіл напрацювання до відмови високонадійної елементної бази має одномодальну форму, тому двопараметричний розподіл є більш адекватною функцією, здатною добре, гнучко апроксимувати подібну статистику.

Підстав вважати, що статистика буде іншою, немає. Спроби „підігнати“ розрахункові показники безвідмовності систем, які отримані на основі експоненціального розподілу відмов, під реальні значення, що досягаються при експлуатації, за допомогою емпіричних коефіцієнтів говорять, природно, не на користь цієї моделі відмов.

Стала інтенсивність відмов λ у експоненціальній моделі надійності означає, що експоненціальний розподіл ніяк не враховує старіння, знос та інші деградаційні процеси, тобто виключає необхідність застосування якісніших матеріалів під час виробництва виробів або проведення профілактичних робіт в процесі експлуатації.

Щільність розподілу відмов у цій моделі максимальна в початковий період експлуатації, отже, модель відображає недосконалу технологію і якість проектування, виготовлення і складання.

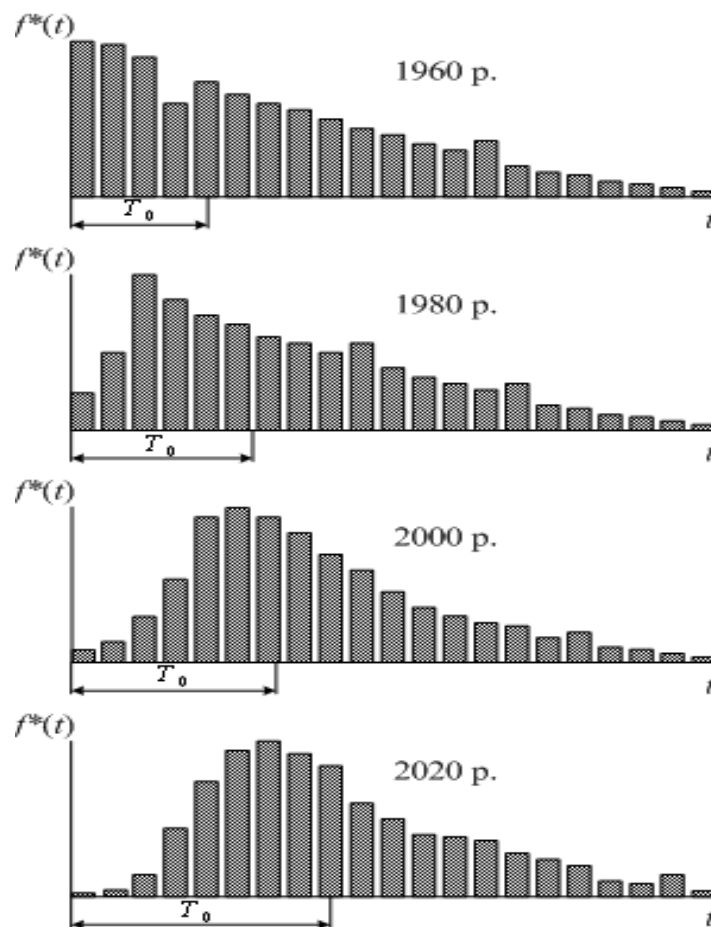


Рис. 10. Динаміка безвідмовності T_0^* елементної бази

6.4 Закон розподілу Вейбулла

Основні характеристики розподілу Вейбулла

Розподіл Вейбулла – двопараметричний закон розподілу випадкового напрацювання до відмови з параметрами: λ_0 , що визначає масштаб, і k , що визначає асиметрію. Розподіл Вейбулла широко використовується для визначення показників надійності ТС, при дослідженні їх міцності і довговічності. Ним описується інтенсивність відмов на всьому проміжку експлуатації ТС.

Розподіл Вейбулла був отриманий емпірично в результаті аналізу великої кількості розподілів ресурсів і відповідає ситуації руйнування самої слабкої ланки (елемента) з деякої сукупності (системи, яка складається з окремих елементів).

Розподіл Вейбулла характеризується такими функціями (рис. 11):

- ймовірністю безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-t^m/t_0} \quad (41)$$

- інтенсивністю відмов:

$$\lambda(t) = (m/t_0) t^{m-1} \quad (42)$$

- щільністю розподілу:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-t^m/t_0} \quad (43)$$

Розподіл Вейбулла також має два параметри: параметр форми $m > 0$ і масштабний параметр $t_0 > 0$.

Математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення визначають відповідно:

$$m_t = B_m t_0^{1/m}; \quad S_t = C_m t_0^{1/m} \quad (44)$$

де B_m і C_m - коефіцієнти.

Якщо протягом певного часу t' відмови не відбуваються, то імовірність безвідмовної роботи визначають за формулою:

$$P(t) = e^{-(t-t')^m/t_0} \quad (45)$$

Іноді характеристики розподілу Вейбулла записують з використанням інших позначень. Наприклад, імовірність безвідмовної роботи можна подати так:

$$P(t) = e^{-(t/a)^b}$$

де $b = m$ і $a = t_0^{1/m}$

Можливості та універсальність закону Вейбулла очевидні з рис. 11.

При $m < 1$ функції $\lambda(t)$ і $f(t)$ спадаючі.

При $m = 1$ розподіл перетворюється на експоненціальний з $\lambda(t) = \text{const}$ і $f(t)$ — спадна функція.

Якщо $m > 1$ функція $f(t)$ має вершину, як у логарифмічно нормальному розподілі, то функція $\lambda(t)$ є безперервно зростаючою і при $1 < m < 2$ випуклою, а при $m > 2$ — увігнутою.

За умови $m = 2$ функція $\lambda(t)$ лінійна у розподілі Вейбулла перетворюється на відомий розподіл Релея.

Якщо $m = 3,3$, то розподіл Вейбулла близький до нормального.

Графічне оброблення результатів випробувань з використанням розподілу Вейбулла проводять у такому порядку:

- логарифмують функцію надійності $\lg P(t) = -t^m/t_0 \cdot 0,4343$;

- вводять позначення $y = -\lg P(t)$;

- логарифмують $\lg y = -m \lg t - A$;

де $A = \lg t_0 + 0,362$.

Відклавши результати випробувань на графіку з координатами $\lg t - \lg y$ (див. рис. 11) і, з'єднавши отримані точки прямою, матимемо $m = \operatorname{tg} \alpha$; $\lg t_0 = A - 0,362$, де α - кут нахилу прямої до осі абсцис; A - відрізок, який відсікає пряма на осі ординат.

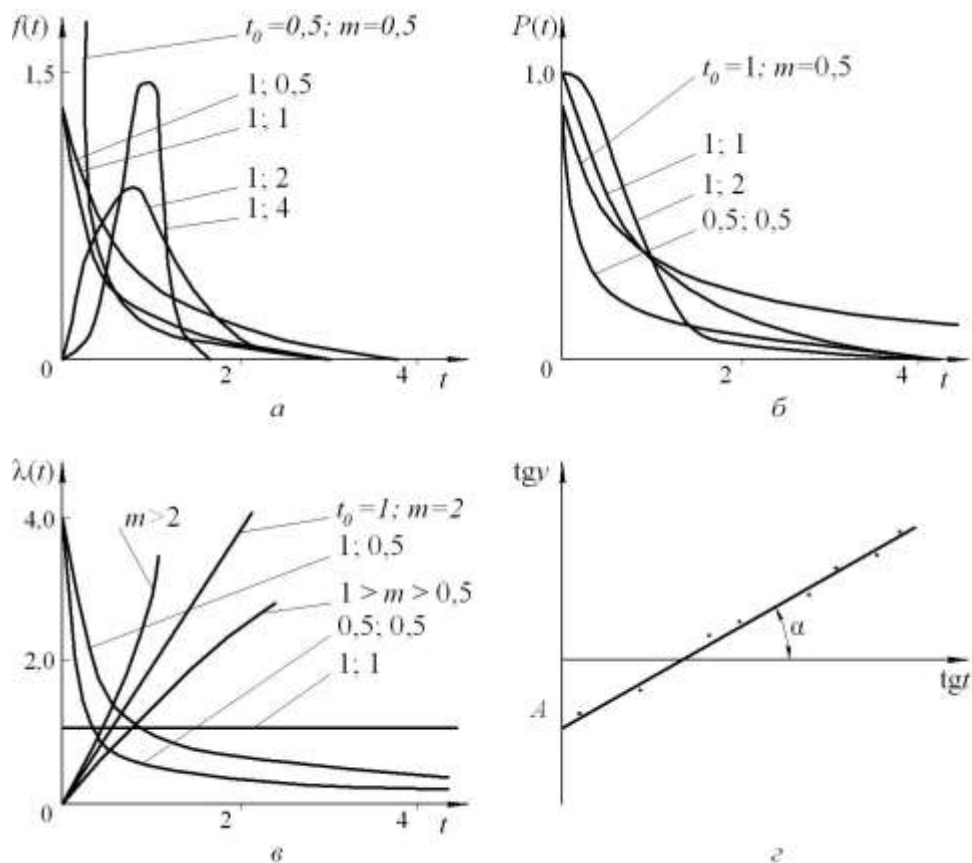


Рис. 11. Характеристики розподілу Вейбулла:

a – щільність розподілу; b – функція надійності; c – інтенсивність відмов; d – графічне визначення параметрів розподілу

Розподіл Вейбулла досить універсальний. Він задовільно описує напруження до відмови деталей машин, які руйнуються від втоми.

Розподіл Вейбулла є досить гнучкою функцією, здатною добре вирівнювати різноманітну статистику відмов, і може бути моделлю відмов, в основному, – механічних виробів.