Механічна форма абразивного зношування – це процес при якому на поверхнях тертя присутні абразивні частинки, що руйнують поверхню за рахунок різання з відокремленням стружки.

Втомні пошкодження – виникають при терті кочення і є результатом інтенсивного руйнування поверхневих шарів металу, що знаходиться в особливо напруженому стані (підшипники, шестерні).

Механо-хімічне нормальне зношування виникає при терті ковзання, кочення при сухому терті і граничному змащуванні.

Швидкість взаємного переміщення деталей:

1…4 м/с – для відпалених сталей;

до 7 м/с – для загартованих сталей;

до 25 м/с – при граничному змащуванні.

Тиск P в парі не перевищує граничного і не руйнує захисні вторинні структури і плівки мастила.

Тепло, що утворюється при терті сприяє розвитку окислювального зносу до певної межі, після чого може спостерігатися дисорбція мастила і схоплювання II роду.

При окислювальному зносі швидкість процесу руйнування становить 0,1 мкм/год.

При наявності абразивних частинок швидкість процесу I форми з переважним механо-хімічним руйнуванням плівок зростає до 0,5 мкм/год, а II форми з переважно механічним руйнуванням від 0,5 мкм/год.

ТЕМА 5. МОДЕЛІ ВІДМОВ

5.1. Зв'язок між ступенем пошкодження і вихідним параметром виробу

Різні види і ступінь пошкодження матеріалу впливають на вихідні параметри виробу, тим самим визначаючи його надійність.

Однак, закон зміни вихідного параметра виробу в часі $X(t)$ може, як відповідати, так і відчутно відрізнятися від залежності ступеня пошкодження

$U(t)$. Між ними є функціональна залежність $X=f(U)$, яка відображає структуру, призначення і принцип дії даного виробу.

При цьому лінійний закон зміни ступеня пошкодження в часі може призвести до нелінійних залежностей вихідного параметра.

Найбільш типовою є лінійна залежність (див рис. 5.1, а), коли u і X зв'язані передаточним коефіцієнтом. Наприклад, при зносі спряження зазор Δ збільшується, підкоряючись залежності $\Delta = \Delta_0 + kU$.

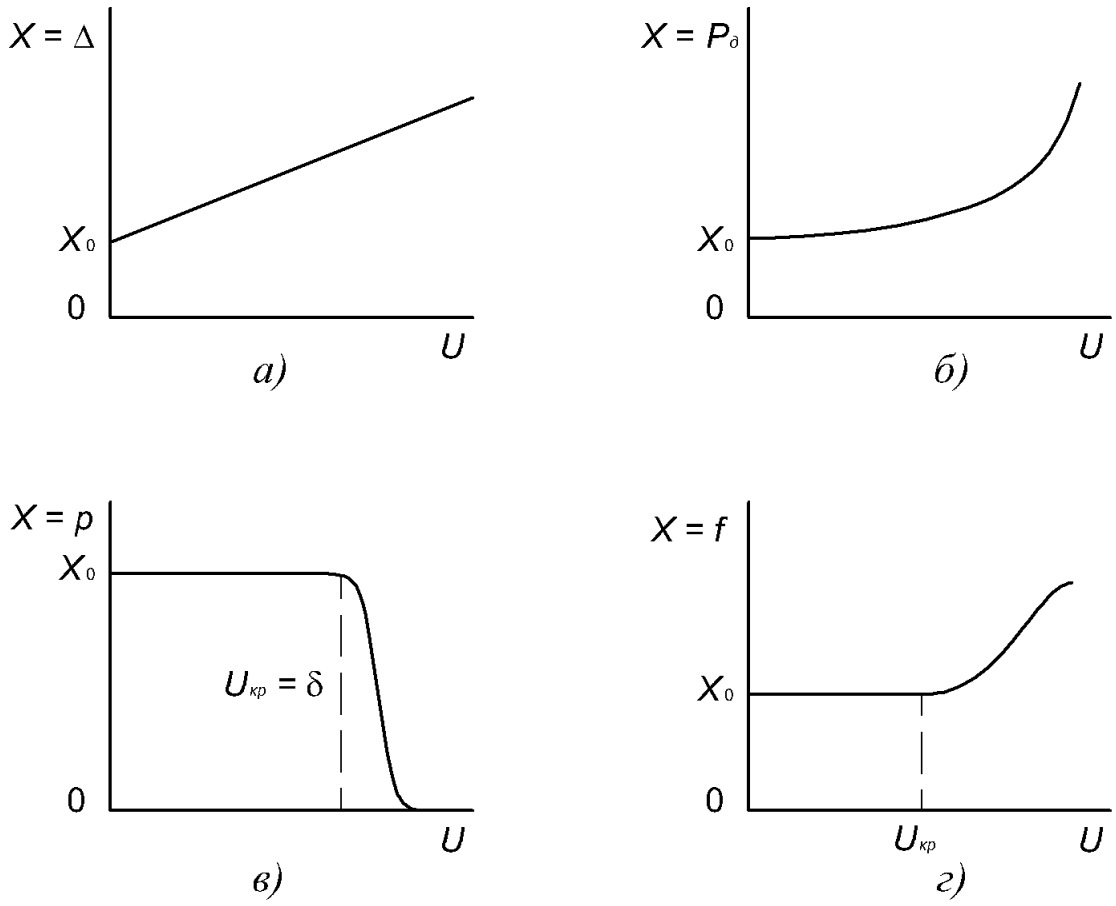


Рисунок 5.1 – Схема типових залежностей між U та X:
а – збільшення зазору внаслідок зносу; б – збільшення динамічних навантажень внаслідок зносу; в – залежність тиску, що витримує резервуар від ступеня корозії стінок; г – залежність коефіцієнту тертя від зносу

Нелінійна залежність (див рис. 5.1, б) між U та X може бути проілюстрована на прикладі виникнення динамічних навантажень при наявності зазорів в спряженні. Сила удару двох пружних тіл нелінійно залежить від

величини зазору і може бути одержана в результаті розв'язку відповідних диференційних рівнянь динаміки.

В ряді випадків залежність вихідного параметра від ступеня пошкодження може мати зону, в якій вихідний параметр не змінюється, з подальшою різкою зміною значення *X*.

Спочатку корозія стінок резервуара не впливає на вихідний параметр(тиск), але через деякий час резервуар взагалі не здатен утримувати рідину (див рис. 5.1, в).

Підшипник ковзання, що працює зі змащуванням при певній величині діаметрального зазору, забезпечує рідинне тертя. В процесі роботи в результаті зносу зазор росте і наступає таке його критичне значення, коли умови гідродинамічного змащування порушуються, характер тертя змінюється, в результаті чого коефіцієнт тертя зростає (див рис. 5.1, г).

5.2. Оцінка віддаленості параметра виробу від граничного стану

При протіканні процесу зношування можливість виникнення відмови пов'язана зі ступенем віддаленості вихідного параметра від його граничного стану. Оцінка цієї ситуації призводить до трьох основних випадків.

1. Якщо за проміжок часу, що розглядається $t = T$ окремі реалізації процесу зміни вихідного параметра в часі $X(t)$ досягнуть граничного стану, то є ймовірність виникнення відмови (див. рис. 5.2, а). Ця ймовірність характеризується законом розподілу, який на даній ділянці $0 \le t \le T$ почав своє формування. Така схема характерна для систем, що мають визначений рівень безвідмовної роботи.

2. Для високонадійних систем характерна схема, коли значення параметрів X значно нижчі за $X_{\max}$ (див. рис. 5.2, б).

3. Як проміжний випадок може бути такий процес, коли параметри, як правило знаходяться в межах $X \le X_{\max}$, однак, окремі реалізації, через близькість до граничного значення, можуть виходити за допустимі межі (див. рис. 5.2, г).

Такі відмови проявляються, як так звані збої, коли при подальшій роботі виробу параметр знов набуває допустимого значення.

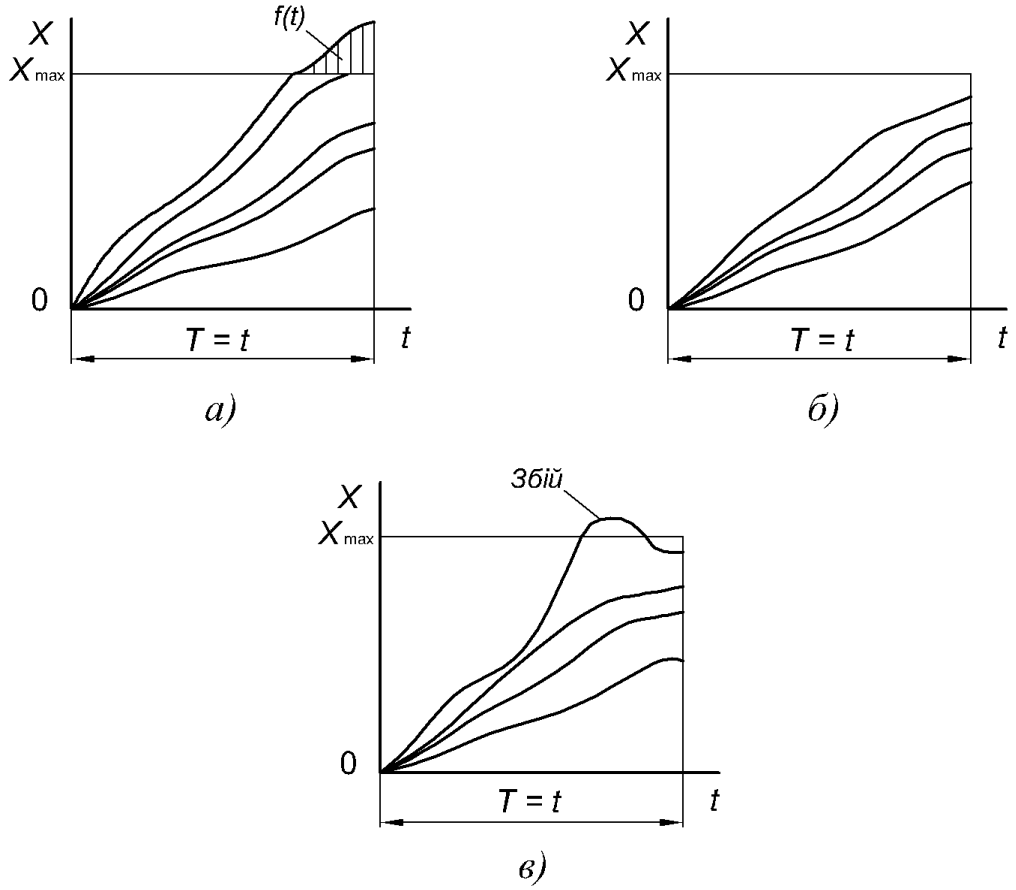


Рисунок 5.2 – Ступінь віддаленості реалізацій $X(t)$ від граничного стану: а – звичайні вироби; б – високонадійні вироби; в – вироби, в роботі яких можливі збої

Якщо ж вихід за допустимі межі пов’язаний з відмовою функціонування, то необхідні спеціальні заходи (ремонт, регулювання) для відновлення втраченої працездатності. Прикладами збоїв можуть служити відмови транспортних систем (лотків) автоматичних ліній через деформацію стінок, забрудненість та засміченість стружкою, вихід розмірів деталі за допустимі межі і т.д.

Моделі, побудова яких дозволить розкрити механізм формування відмови і дасть можливість оцінити надійність виробу ще на стадії проектування, повинні в першу чергу враховувати ступінь віддаленості виробу від граничного стану.

5.3. Формування закону зміни вихідного параметру у часі

Закон зміни вихідного параметру у часі $X(t)$ формується під впливом протікання випадкового процесу пошкодження виробу та його елементів і, як правило, невипадкової перехідної функції $X=f(U)$.

При лінійній залежності X від U закони зміни вихідних параметрів аналогічні до відповідних закономірностей для $U(t)$, що характерно для більшості виробів. При нелінійній залежності між U та X відбувається формування реалізацій вихідного параметра за наступною схемою (див. рис. 5.3). Для прикладу візьмемо монотонно спадаючий процес пошкодження $U(t)$ і нелінійну залежність між U та X, коли з ростом ступеня пошкодження, вихідний параметр збільшується з наростаючою інтенсивністю.

З побудови двох реалізацій для вихідного параметра X_1 та X_2 видно, що вони більш суттєво відрізняються одна від другої, ніж визначаючі їх реалізації U_1 та U_2. Це пов'язано з характером функції $X = f(U)$.

Можливі варіанти, коли лінійна зміна в часі ступеня пошкодження призведе до нелінійних змін вихідного параметра і навпаки. Тому дослідження і аналіз вихідних параметрів виробу повинні базуватися на оцінці двох вказаних основних факторів, що визначають їх формування.

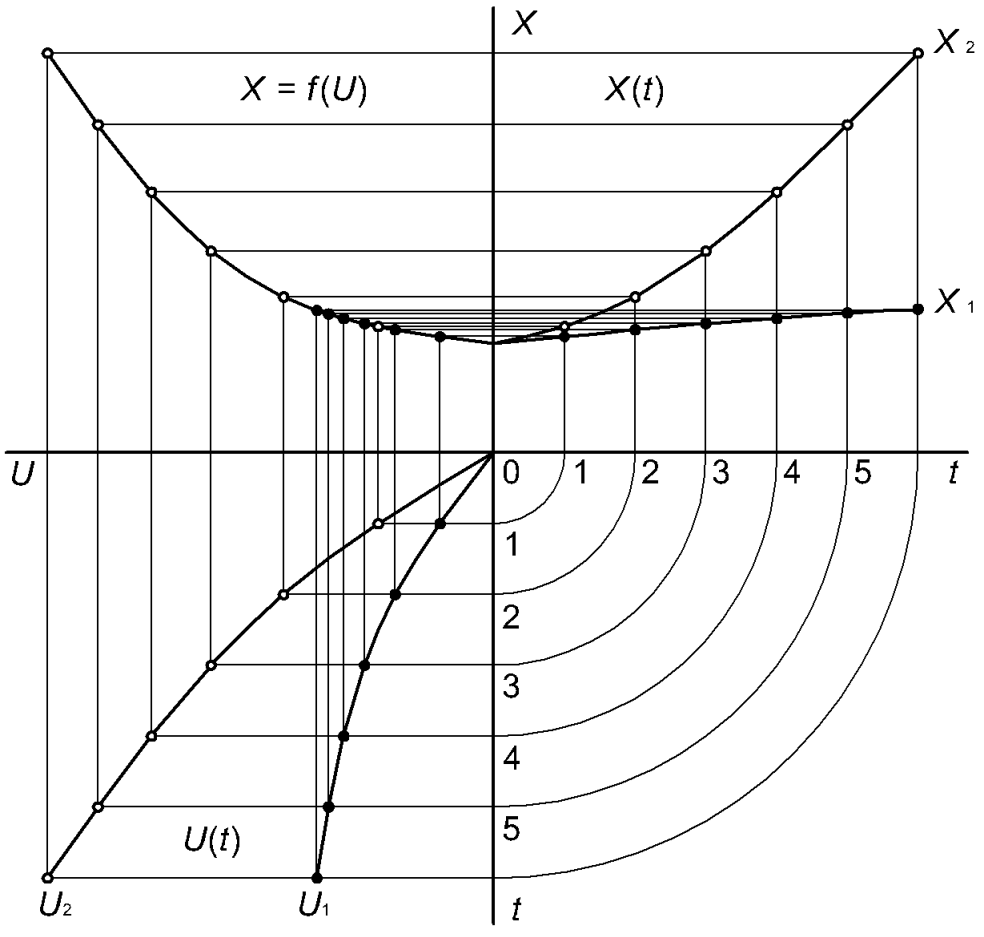


Рисунок 5.3 – Схема формування закону зміни вихідного параметру $X(t)$ виробу

5.4. Закони розподілу термінів служби до відмови

Закон розподілу часу роботи виробу до відмови, виражений в диференційній формі у вигляді щільності ймовірності $f(t)$, або в інтегральній формі у вигляді функції розподілу $F(t)$, є повною характеристикою надійності виробу або його елемента. Він дозволяє визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)=1-F(t)$, математичне сподівання (напрацювання до відмови):

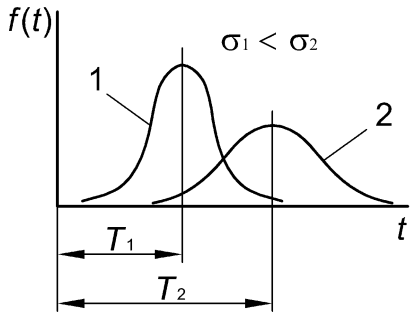
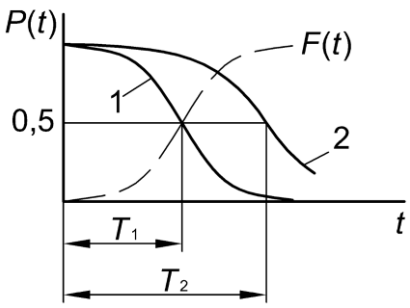
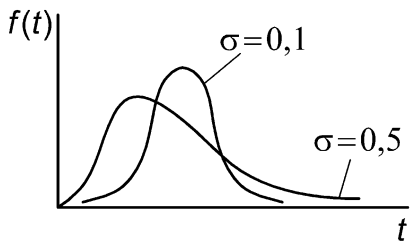
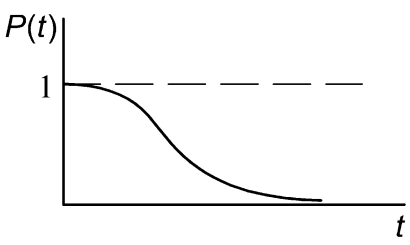
$$T_{cp} = \int_0^\infty f(t)tdt = \int_0^\infty P(t)dt,$$

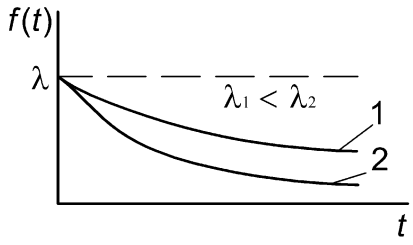
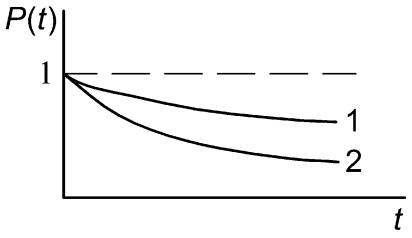
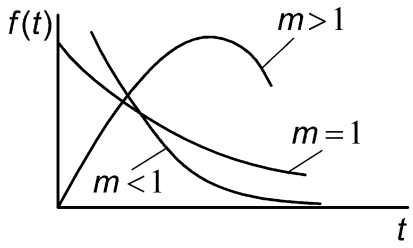
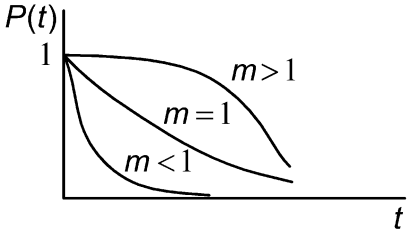
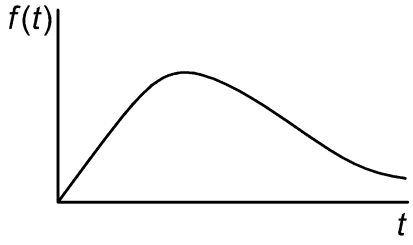
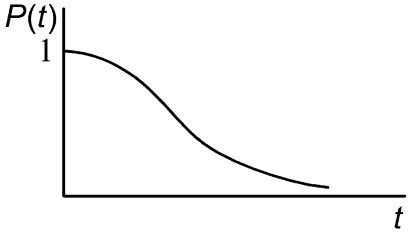
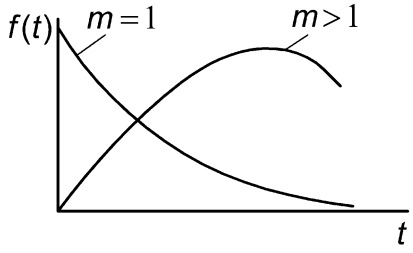
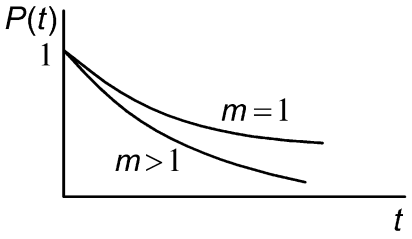
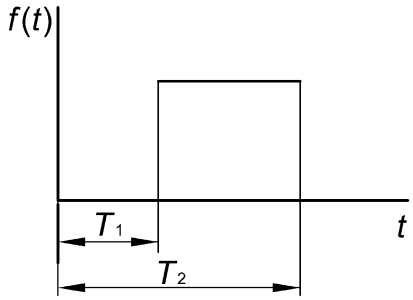
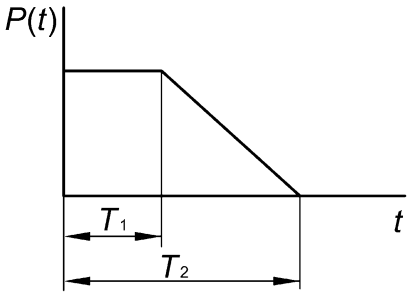
дисперсію D, або середнє квадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{D}$,

$$D = \int_0^\infty (\mathrm{T_{ср}} - t)^2 f(t)dt,$$

а також численні характеристики більш високих порядків – квантілі (значення випадкової величини, що відповідає заданій ймовірності).

Таблиця 5.1 – Закони розподілу термінів служби до відмови

Закон	$f(t)$	$P(t)$
Нормальний (Гауса) $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\overline{T})^2}{2\sigma^2}}$ $P(t) = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{t-\overline{T}}{\sigma}\right)$		
Логарифмічно нормальний $f(t) = \frac{1}{t\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \ln T_1)}{2\sigma_1^2}}$ $P(t) = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{\ln t - \ln T_1}{\sigma_1}\right)$		

Експоненціальний $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$ $P(t)=e^{-\lambda t}=e^{-\frac{t}{T}}$		
Вейбула $f(t)=\frac{mt^{m-1}}{T_1}e^{-\frac{t^m}{T_1}}$ $P(t)=e^{-\frac{t^m}{T_1}}$, де m – параметр форми		
Релея $f(t)=\frac{t}{\sigma^2}e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$ $P(t)=e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$		
Гамма-розподіл $f(t)=\frac{t^{m-1}}{T_1^m\tilde{A}(m)}e^{-\frac{t}{T_1}}$ $P(t)=\int_0^{\infty}f(t)dt$		
Рівномірний розподіл при $T_1 \le t \le T_2$: $f(t)=\frac{1}{T_2-T_1}$ $P(t)=\frac{T_2-t}{T_2-T_1}$		

Підставою для застосування того чи іншого закону розподілу і оцінки його параметрів є дослідні дані, які одержані при випробуваннях виробів, експлуатаційні спостереження або теоретичні передумови.

При цьому повинні застосовуватись методи перевірки статистичних гіпотез про відповідність даного закону розподілу.

Нормальний закон в ряді випадків рекомендують застосовувати при зносі і других поступових відмовах. Однак, часто спостерігаються асиметричні закони розподілу. В цих випадках можуть застосовуватись: логарифмічно-нормальний розподіл; закон Вейбула; гамма-розподіл; розподіл Релея. Вони часто застосовуються при оцінці результатів випробувань на втомну міцність.

У випадку, коли на виріб діють зовнішні фактори, що призводять до відмови незалежно від його стану і тривалості попередньої експлуатації, тобто коли виникають раптові відмови, вони можуть описуватися експоненціальним або рівномірним розподілом.

Найбільш універсальними є ті закони розподілу, котрі за рахунок зміни числових параметрів можуть приймати різний вигляд.

Так закон Вейбула при $m = 1$ перетворюється в експоненціальний закон, при $m > 1$ може бути близьким до нормального, а при $m = 2$ – одержимо розподіл Релея. Те саме стосується і гамма-розподілу. Тому такі закони мають значну гнучкість і можуть відображати різні причини відмов.

5.5. Модель формування поступових відмов

В загальному випадку значення вихідного параметра виробу в будь який момент часу визначається залежністю

$$X = a + \gamma t,$$

де a – початковий параметр виробу, який є випадковою величиною і підкоряється певному закону розподілу.

Термін служби є функцією двох незалежних випадкових елементів a і γ:

$$T = \frac{X_{\max} - a}{\gamma}.$$

Для визначення закону розподілу $f(t)$, необхідно проводити складні математичні дії для функції двох змінних.

Однак, якщо випадкові аргументи a і γ розподілені згідно нормального закону, то і параметр X для кожного значення $t = T$ буде підкорятися тому ж закону з параметрами.

Математичне сподівання

$$X_{\text{ñð}} = a_0 + \gamma_{\text{ñð}} T .$$

Середнє квадратичне відхилення

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2} ,$$

де a_0 – математичне сподівання; σ_a – середнє квадратичне відхилення параметра a.

Ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(T) = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{\text{ñð}} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right].$$

На рис. 5.4 представлена схема формування поступової відмови при розсіюванні початкових параметрів виробу.

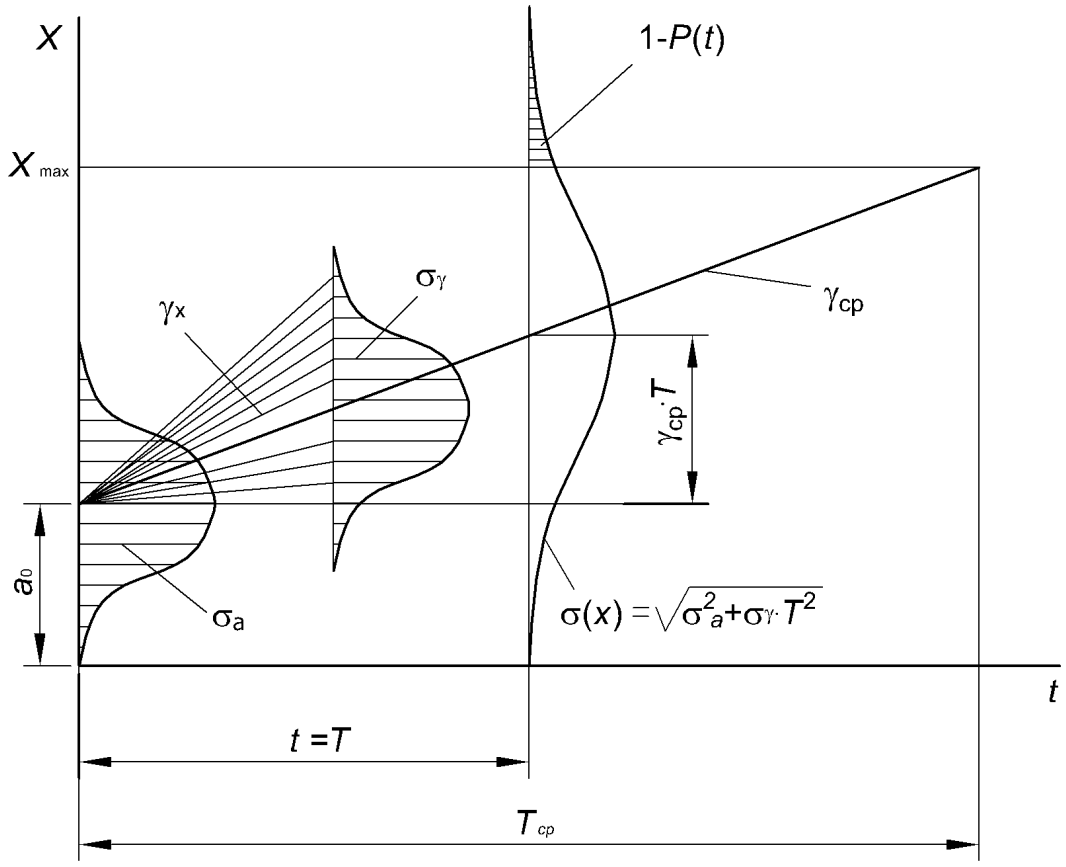


Рисунок 5.4 – Схема формування поступової відмови при розсіюванні початкових параметрів виробу

5.6. Модель раптової відмови

Причина виникнення раптових відмов не пов'язана зі зміною стану виробу і терміном його попередньої роботи, а залежить від рівня зовнішніх впливів.

Тому, при побудові моделі раптової відмови треба охарактеризувати зовнішні умови, що можуть призвести до відмови. Ці умови можуть оцінюватися *інтенсивністю відмов* λ – ймовірністю виникнення відмови в одиницю часу при умові, що до цього моменту відмова не виникла.

Застосування λ характеристики зручне в тому випадку, коли вона не змінюється в часі і характеризує умови можливого виникнення відмови.

Приймаючи λ = const, одержуємо експоненціальний закон надійності:

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

Щільність ймовірності для цього закону:

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

Середній термін служби до відмови:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}.$$

На рисунку 5.5 представлено схеми застосування експоненціального закону при раптових відмовах

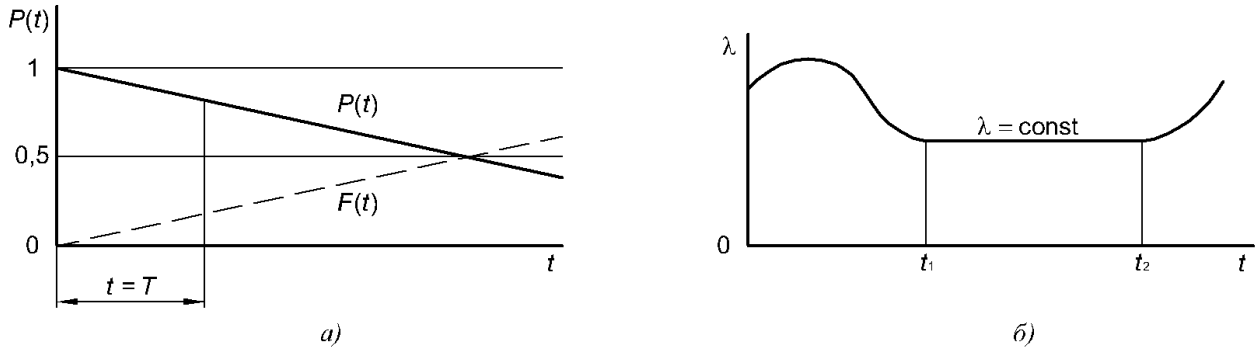


Рисунок 5.5 – Експоненціальний закон при раптових відмовах:
а) щільність ймовірності; б) крива інтенсивності відмов

5.7. Загальна схема втрати машиною працездатності

Розглянуті моделі відмов описували втрату виробом працездатності від впливу тих чи інших процесів, що протікають з певною швидкістю. В дійсності,

якщо розглядати машину, або складний виріб, картина ускладнюється тим, що мають місце категорії процесів, з різною швидкістю перебігу.

На машину діють і швидкоплинні процеси і процеси середньої швидкості і ті, що протікають поволі. Крім того кожен виріб або машина, характеризується декількома вихідними параметрами і її зона працездатності, в загальному випадку, описується в *n*-мірному фазовому просторі.

При цьому за рахунок ремонту і технічного обслуговування можуть частково або повністю відновлюватися втрачені.

ТЕМА 6. ГРАНИЧНИЙ СТАН ВИРОБУ

6.1. Встановлення гранично допустимих значень вихідних параметрів

Граничний стан характеризує вихід виробу за межі працездатного стану. У всіх розглянутих раніше моделях відмов рахувалося, що значення X_{max} відоме. Але для оцінки надійності складного виробу і для забезпечення необхідних нормативно-технічних показників необхідно встановити гранично допустимі значення всіх тих параметрів, елементів та деталей, від яких залежить працездатність виробу в цілому.

Гранично допустимий стан може бути встановлений як для ступеня пошкодження виробу (U_{max}), так і для вихідного параметру виробу (X_{max}).

Встановлення X_{max} є основним, оскільки саме зміна вихідного параметра визначає область працездатності виробу. Крім того, умову $X < X_{max}$ легко контролювати.

Оскільки зміна вихідних параметрів виробу є наслідком пошкодження його окремих елементів, для відновлення працездатності необхідно вирішувати питання які з елементів виробу, потребують ремонту або заміни через недоступний ступінь пошкодження. Тому поряд з призначенням X_{max} необхідно встановлювати U_{max} для елементів, які приймають участь у формуванні вихідного параметра.

При цьому може бути три основних випадки взаємозв’язку між X_{max} та U_{max}.