

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя



Кафедра автомобілів

## КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

**«Надійність автотранспортних засобів»**

для здобувачів освітнього рівня магістр  
за спеціальністю

274 «Автомобільний транспорт»

Тернопіль  
2024



Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

Кафедра автомобілів

# **Конспект лекцій**

з дисципліни

**«Надійність автотранспортних засобів»**

для здобувачів освітнього рівня магістр

за спеціальністю

274 «Автомобільний транспорт»

Тернопіль  
2024

Конспект лекцій розроблено відповідно до навчального плану підготовки здобувачів вищої освіти, освітнього рівня магістр за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт».

Укладачі:

*Ткаченко І.Г.*, канд. канд. техн. наук, доцент.

*Левкович М.Г.*, канд. техн. наук, доцент;

Рецензент:

*Аулін Віктор Васильович.*, доктор техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету.

Конспект лекцій розглянуто й затверджено на засіданні методичного семінару кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.  
Протокол № 2 від 21 лютого 2024 р.

Схвалено та рекомендовано до друку на засіданні методичної ради факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.  
Протокол № 6 від 29 лютого 2024 р.

Конспект лекцій з дисципліни «Надійність транспортних засобів» для здобувачів освітнього рівня магістр за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» / Укладачі: Ткаченко І.Г., Левкович М.Г. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 118 с.

© Ткаченко І.Г., Левкович М.Г.

2024

© Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

2024

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
ТЕМА 1. ЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ СУЧАСНИХ МАШИН.....	7
1.1. Предмет науки про надійність.....	8
1.2. Теоретична база науки про надійність.....	9
1.3. Основні поняття і визначення в теорії надійності.....	10
1.4. Показники оцінки безвідмовності виробу.....	12
1.5. Показники оцінки довговічності виробу.....	16
1.6. Економічні показники надійності.....	18
1.7. Класифікація машин за надійністю.....	19
ТЕМА 2. ПРИЧИНИ ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ.....	21
2.1. Класифікація відмов.....	22
2.2. Допустимі і недопустимі види пошкоджень.....	25
2.3. Параметрична надійність машин.....	25
ТЕМА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ.....	26
3.1. Зміна властивостей і стану матеріалів.....	26
3.2. Фізична природа виникнення відмов.....	27
3.3. Закони старіння.....	28
3.4. Поверхневий шар і його параметри.....	29
3.5. Поверхневі явища, при наявності змащування.....	30
3.6. Класифікація процесів старіння.....	30
3.7. Типові закономірності протікання процесів старіння.....	32
ТЕМА 4. ЗНОШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ.....	34
ТЕМА 5. МОДЕЛІ ВІДМОВ.....	44
5.1. Зв'язок між ступенем пошкодження і вихідним параметром виробу.....	44
5.2. Оцінка віддаленості параметра виробу від граничного стану.....	46
5.3. Формування закону зміни вихідного параметру у часі.....	47
5.4. Закони розподілу термінів служби до відмови.....	49
5.5. Модель формування поступових відмов.....	51
5.6. Модель раптової відмови.....	53
5.7. Загальна схема втрати машиною працездатності.....	53
ТЕМА 6. ГРАНИЧНИЙ СТАН ВИРОБ.....	54
6.1. Встановлення гранично допустимих значень вихідних параметрів.....	54
6.2. Критерії оцінки граничного стану за вихідним параметром.....	55
6.3. Регламентація граничних станів в нормативно-технічній документації..	56
6.4. Максимально допустиме значення вихідного параметра, як випадкова величина.....	57

6.5. Максимальні і допустимі значення параметрів з урахуванням системи ремонту.....	58
ТЕМА 7. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ МАШИН.....	59
7.1. Безвідмовність об'єктів, що не ремонтуються.....	59
7.2. Безвідмовність об'єктів, що ремонтуються.....	66
7.3. Довговічність машин і механізмів.....	71
ТЕМА 8. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ ТА ЗБЕРЕЖУВАНOSTІ МАШИН.....	78
8.1. Ремонтопридатність машин і механізмів.....	78
8.2. Збережуваність.....	81
8.3. Оцінка надійності парку машин (комплексні показники надійності).....	82
ТЕМА 9. РОЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НАДІЙНОСТІ.....	86
9.1. Зв'язок параметрів технологічного процесу з показниками надійності..	86
9.2. Класифікація причин, що викликають недопустимі відмови з вини технології.....	88
9.3. Вплив параметрів технологічного процесу на зносостійкість поверхонь	89
9.4. Вплив параметрів технологічного процесу на втомну міцність деталей.	91
9.5. Вплив параметрів технологічного процесу на корозійну стійкість виробів.....	91
9.6. Надійність технологічного процесу.....	92
9.7. Забезпечення надійності технологічного процесу.....	93
9.8. Формування показників надійності технологічного процесу.....	94
9.9. Створення запасу надійності технологічного процесу.....	96
ТЕМА 10. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МАШИН.....	98
10.1. Класифікація технологічних засобів підвищення надійності машин....	98
10.2. Зміцнення поверхонь деталей машин пластичним деформуванням (наклепом).....	100
10.3. Термомеханічна обробка.....	101
10.4. Поверхневе гартування.....	101
10.5. Наплавлення та напилювання матеріалу на робочі поверхні.....	102
11. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....	103
11.1. Втомне руйнування деталей.....	103
11.2. Цикл напружень та його параметри.....	105
11.3. Діаграма граничних напружень.....	108
11.4. Вплив форми та розмірів деталей на втомну міцність.....	110
11.5. Вплив якості поверхні на втомну міцність деталей.....	110
ТЕМА 12. ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ.....	111

12.1. Загальні положення.....	111
12.2. Класифікація видів і методів випробувань.....	112
12.3. Випробування матеріалів на стійкість.....	113
12.4. Метод послідовних випробувань.....	114
12.5. Контрольна обкатка об'єктів.....	115
12.6. Випробування на надійність складних систем.....	116
12.7. Використання методу прогнозування та моделювання.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

## ВСТУП

Надійність є однією з ключових проблем сучасної техніки, яка визначається на всіх етапах життєвого циклу технічних засобів — від моменту виникнення ідеї до їхньої утилізації. Інженерний аналіз показників надійності дозволяє виявляти слабкі місця під час проектування, виробництва, випробувань, експлуатації та ремонту автомобільного транспорту і технологічного обладнання. Надійність автомобілів є підсумковою дисципліною, що інтегрує різні інженерні науки, хоча її фізичну основу становлять триботехніка і трибофатика, а ключовими математичними методами є теорія ймовірностей та математична статистика.

Оволодіння основами надійності автомобілів і технологічного обладнання сприяє підвищенню ефективності їх експлуатації, зниженню витрат паливно-енергетичних ресурсів, а також заощадженню робочого часу і фінансових ресурсів. Тому вивчення такої дисципліни, як «Надійність автотранспортних засобів», є одним із ключових елементів у загальному циклі підготовки фахівців технічних спеціальностей. Це дозволяє забезпечити здобувачів необхідними знаннями для оптимізації роботи транспортних засобів і технологічного обладнання, що має велике значення для їхньої подальшої професійної діяльності.

Вивчення цієї дисципліни має на меті навчити майбутніх фахівців кваліфіковано ідентифікувати та аналізувати причини відмов техніки; проводити випробування та оцінювати кількісні й якісні показники надійності автомобілів. Також здобувачі повинні здобути навички розробки та впровадження заходів для забезпечення та підвищення надійності автомобільної техніки й технологічного обладнання на всіх етапах їхнього життєвого циклу. Це включає як проектування, так і експлуатацію, технічне обслуговування і ремонт.



## **ТЕМА 1. ЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ СУЧАСНИХ МАШИН**

В час НТР перед людством відкриваються значні можливості, але технічний прогрес пов'язаний зі створенням нових складних машин і приладів, з постійним підвищенням вимог до їх характеристик, з необхідністю об'єднувати в єдині комплекси самі різноманітні технічні пристрої.

Все це призводить до того, що виникають нові науково-технічні проблеми. Однією з основних проблем машинобудування є проблема надійності.

Для сучасних машин характерні такі напрямки їх розвитку як збільшення ступеня автоматизації; підвищення робочих параметрів (навантажень, швидкостей, температур); підвищення вимог до точності функціонування, надійності, потужності, об'єднання машин в системи з єдиним керуванням.

Удосконалення машин і підвищення вимог до них призвели до необхідності підвищення вимог до їх надійності і довговічності.

Надійність відображає властивість машин зберігати необхідні якісні показники на протязі всього періоду експлуатації.

Ненадійна машина не може ефективно функціонувати, оскільки кожна її зупинка через пошкодження елементів або зниження технічних характеристик нижче допустимого рівня тягне за собою значні матеріальні збитки.

В даний час промисловість навіть передових країн світу має значні втрати через недостатню надійність і довговічність машин. Так за весь період експлуатації затрати на ремонт та технічне обслуговування машин в декілька разів перевищує вартість нової машини, наприклад, для літаків – до 5 разів, для верстатів – до 8 разів. Через корозію кожного року втрачається до 10 % металу, що виплавляється.

Відчутне недовикористання потенційних можливостей в першу чергу стосується машин і агрегатів, до яких висуваються підвищені вимоги безпеки. Вони знімаються з експлуатації значно раніше потенційних можливостей більшості даних виробів.

До особливо великих затрат часу і ресурсів призводить вихід з ладу унікальних машин (турбін, доменних печей, ПТМ).

Ненадійна робота технологічного обладнання може призвести до виготовлення неякісної продукції.

Відмови техніки які призводять до катастроф і загибелі людей взагалі неможливо оцінювати економічними показниками.

Особливістю проблеми надійності є її зв'язок зі всіма етапами проектування, виготовлення і експлуатації.

Кожен з етапів вносить свою частку у вирішення складної задачі створення машини необхідного рівня надійності з мінімальними затратами часу і коштів.

Під час проектування і розрахунків машини закладається її надійність. Вона залежить від конструкції машини та її вузлів, застосованих матеріалів, методів захисту від різноманітних шкідливих впливів, пристосованості до ремонту та обслуговування, а також інших конструктивних особливостей.

Під час виготовлення забезпечується надійність машини. Вона залежить від якості виготовлення деталей, методів контролю, можливостей керування ходом технологічного процесу, якості складання, методів випробувань готової продукції та інших показників технологічного процесу.

Під час експлуатації машини реалізується її надійність. Показники безвідмовності і довговічності виявляються лише в процесі використання машини та залежать від методів і умов експлуатації машини, прийнятої системи ремонту, методів технічного обслуговування, а також інших експлуатаційних факторів.

### **1.1. Предмет науки про надійність**

Наука про надійність вивчає закономірності зміни показників якості, технічних пристроїв і систем на основі цього розробляє методи, що забезпечують необхідну тривалість їх роботи з найменшими затратами часу і ресурсів.

Специфічними особливостями питань надійності є:

- фактор часу, оскільки зміна початкових параметрів машини оцінюється в процесі її експлуатації;
- прогнозування поведінки об'єкта з точки зору збереження його вихідних параметрів.

Зміни показників якості машини можуть бути абсолютними і відносними.

Абсолютна зміна якості пов'язана з різноманітними процесами і впливами на машину, що змінюють властивості і стан матеріалів, з яких вона виготовлена. (Фізичне старіння).

Відносна зміна якості машини пов'язана з появою нових машин з більш доскональними характеристиками. (Моральний знос).

Наука про надійність вивчає зміни показників якості машини від впливу тих причин, що призводять тільки до абсолютних змін її якісних показників.

Основна складність при оцінці надійності машини полягає у прогнозуванні поведінки машини в різноманітних умовах експлуатації, оскільки констатація того чи іншого рівня надійності машини, що відпрацювала свій ресурс має незначну цінність, особливо на ранніх стадіях створення машини.

Наука про надійність не розглядає питань досягнення певного рівня показників якості машини (точність, потужність, ККД, продуктивність), а розглядає процеси зміни цих показників у часі.

Наука про надійність розвивалася за двома основними напрямками.

Перший, який виник в радіоелектроніці, пов'язаний з розвитком математичних методів оцінки надійності, особливо стосовно складних систем, за допомогою статистичної обробки експлуатаційної інформації, з розробкою структури складних систем.

Другий напрямок, який виник в машинобудуванні, пов'язаний з вивченням фізики відмов (зносу, втомної міцності, корозії) з розробкою методів розрахунку на міцність, знос, теплостійкість з застосуванням технологічних прийомів, що забезпечують необхідну надійність машини.

В даний час йде процес злиття цих двох напрямків.

## **1.2. Теоретична база науки про надійність**

Наука про надійність базується на фундаментальній математиці та інших науках.

Математичні методи теорії надійності на основі теорії ймовірності і математичної статистики дають можливість вирішувати основні аспекти

проблеми надійності виробів. Математика – це інструмент, ефективність використання якого залежить від ступеня відповідності його можливостей поставленому завданню.

Для машинобудування необхідно враховувати специфіку виникнення і усунення відмов, яка пов'язана з тим, що не тільки статистика відмов є ключем до вирішення задач надійності виробів. Головне полягає у виявленні тих фізичних процесів які призводять до зміни початкових показників якості машини.

Другою теоретичною основою науки про надійність є результати досліджень природничих наук. Сюди відносяться науки, які вивчають види механічних руйнувань (опір матеріалів), зміни, що відбуваються у матеріалах та їх поверхневих шарах (фізико-хімічна механіка, тріботехніка), хімічні процеси руйнування в матеріалах.

Для науки про надійність характерне поєднання імовірнісних методів оцінки процесів зміни параметрів машини з виявленням детермінованих закономірностей процесів старіння і руйнування, а також оцінки умов виробництва машин, що визначають їх працездатність.

В розвиток науки про надійність вагомий вклад внесли українські вчені, зокрема: Костецький Б.І., Носовський І.Г., Бершадський Л.І., Райко М.В., Запорожець В.В. та ін.

### **1.3. Основні поняття і визначення в теорії надійності**

При вивченні надійності технічних пристроїв розглядаються різноманітні об'єкти: машини, споруди, апаратура та ін. Для машинобудування об'єкт розгляду називають виробом. В залежності від поставленої задачі виробом може бути окрема деталь, кінематична пара, вузол, агрегат, машина в цілому або система машин.

Кожен виріб характеризується певними вихідними параметрами – величинами, що визначають показники якості даного виробу. Вихідні параметри характеризують різноманітні властивості даного виробу. Це можуть бути

показники точності функціонування, механічні характеристики, кінематичні та динамічні параметри, економічні показники.

Зазвичай кожен виріб характеризується рядом вихідних параметрів, значення яких зафіксовано в нормативних документах (стандартах, ТУ, паспорті).

Терміни та визначення в науці про надійність стандартизовані.

*Працездатність* – це стан виробу, при якому він здатен виконувати задані функції, зберігаючи значення вихідних параметрів в межах, встановлених нормативно-технічною документацією.

Технічна документація передбачає рівень зовнішніх впливів, методи ТО і ремонтів, норми і допустимі відхилення від встановлених параметрів.

Тому, працездатність пов'язана не лише з можливістю працювати, а і з тим, щоби при цьому вихідні параметри виробу знаходились у допустимих межах.

*Відмова* – це подія, яка полягає у порушенні працездатності виробу.

Приклади: поломка вала, заклинювання клапана гідросистеми, вихід за допустимі межі ККД двигуна, деформація станини верстата ті ін.

Різні відмови тягнуть за собою різноманітні наслідки: від незначних відхилень в роботі машини, до аварійних ситуацій.

Будь яка відмова може виникнути через певний проміжок часу, що є випадковою величиною. Тут може бути два основних випадки.

Перший – коли час оцінюється календарною тривалістю роботи виробу. Це характерно для таких причин порушення працездатності як корозія, вплив зовнішніх факторів (температура, опромінення), час роботи до відмови в цьому випадку називають *терміном служби до відмови*.

Однак, для більшості машин і механізмів основне значення при оцінюванні втрати працездатності має не календарний термін, а тривалість роботи виробу або відповідний обсяг виконаної роботи (число циклів, шлях, продуктивність). Термін роботи виробу до відмови, виражений в годинах називається в цьому випадку *напрацюванням до відмови*.

Термін служби або напрацювання виробу до відмови – це час досягнення граничного значення будь яким з його вихідних параметрів.

Напрацювання або термін служби до граничного регламентованого стану називаються відповідно *ресурсом або допустимим терміном служби*.

Необхідно відзначити, що час роботи виробу до відмови – випадкова величина, а ресурс – регламентована.

*Надійність* – це властивість виробу зберігати в часі свою працездатність.

Надійність виробу – узагальнене поняття, що включає в себе поняття безвідмовності і довговічності.

*Безвідмовність* – це властивість виробу безперервно зберігати працездатність на протязі певного проміжку часу або певного напрацювання.

*Довговічність* – це властивість виробу зберігати працездатність до настання граничного стану, тобто на протязі всього періоду експлуатації при встановленій системі ТО і ремонтів.

Основні причини, що визначають надійність виробу, пов'язані, як правило, з випадковими явищами, для опису яких застосовується математичний апарат теорії ймовірності.

Так, відмова – це випадкова подія, термін служби або напрацювання до відмови – випадкова величина, а процес, що призводить до втрати працездатності – випадкова функція. Тому показники, що застосовуються для оцінки надійності мають імовірнісну природу.

#### **1.4. Показники оцінки безвідмовності виробу**

Основним показником безвідмовності виробу є *ймовірність безвідмовної роботи*  $P(t)$  (коефіцієнт надійності) – це ймовірність того, що в заданому інтервалі часу  $t = T$  (або в межах заданого напрацювання) відмова виробу не виникає.

Значення  $P(t)$ , може знаходитись в межах  $0 \leq P(t) \leq 1$ . Наприклад, якщо ймовірність безвідмовної роботи машини на протязі  $T = 1000$  год. складає 0,95, то це означає, що з великої кількості машин даної моделі в середньому 5 % машин втратять свою працездатність раніше, ніж через 1000 год. роботи.

Для одного виробу – це шанс пропрацювати без відмов заданий проміжок часу.  $P(t)$  і  $F(t)$  (ймовірність відмови) утворюють повну групу подій, тобто.

$$P(t) + F(t) = 1.$$

Допустиме значення  $P(t)$  вибирається в залежності від ступеня небезпечності відмови. Наприклад, для відповідальних виробів авіатехніки значення коефіцієнта надійності доходять до  $P(t) = 0,9999$  і вище, тобто практично дорівнюють одиниці. Слід відзначити, що застосування  $P(t)$  без вказування періоду часу  $t = T$ , на протязі якого розглядається робота виробу не має змісту. На рис 1.1 приведено залежність ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  виробу від часу його експлуатації.

Криві  $P_1(t)$  і  $F_1(t)$  симетричні і перетинаються в точці, що відповідає середньому (медіанному) терміну служби  $t = T_{сер}$  при якому  $P(t) = F(t) = 0,5$ .

Крива  $P_2$  – для більш надійного виробу.

Вибираючи значення  $T$  можна для будь якого виробу забезпечити необхідне значення  $P(t)$  оскільки вони функціонально зв'язані залежністю:

$$P(t) = \int_{t=T}^{\infty} f(t)dt,$$

де  $f(t)$  – щільність ймовірності для терміну служби (напрацювання) виробу за даним вихідним параметром.

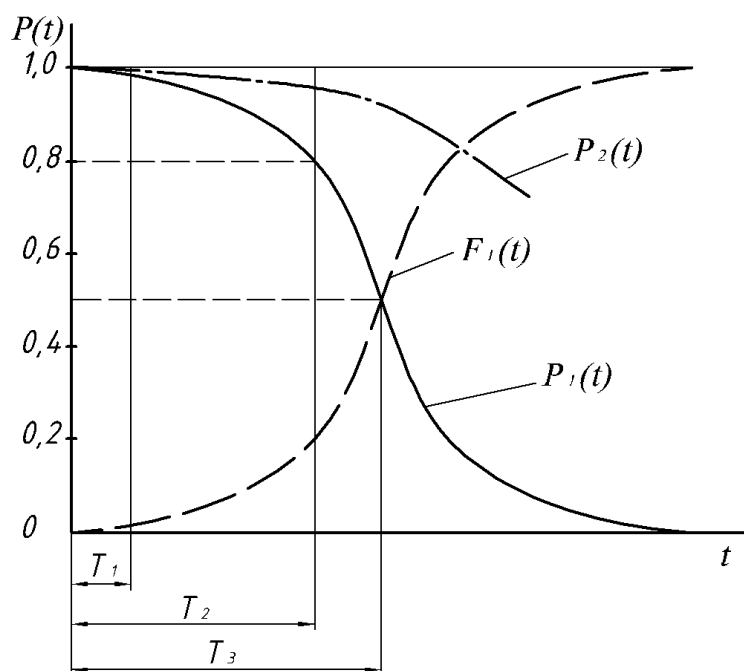


Рисунок 1.1 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  виробу від часу його експлуатації

При цьому може бути два способи виробу показників:

1. При високих вимогах до надійності виробу задаються допустимим значенням  $P(t) = \gamma \%$  і визначають термін роботи виробу  $t = T_\gamma$ , що відповідає даній регламентованій ймовірності безвідмовної роботи. Значення  $T_\gamma$  називається гамма-процентним ресурсом і за його величиною оцінюють безвідмовність виробу.

2. При звичайних вимогах до надійності (коли відмова не призводить до катастрофічних наслідків) можна задатися ресурсом виробу  $t = T_p$  (або терміном служби  $t = T_{cl}$ ), наприклад з умови необхідності проведення планового ремонту всієї машини. В цьому випадку безвідмовність виробу оцінюють безпосередньо за значенням  $P(t)$ .

Хоча значення  $P(t)$  за певний проміжок часу  $t = T$  і є основним показником безвідмовності бувають випадки, коли виникає необхідність у додаткових показниках.

Перший випадок пов'язаний з таким періодом  $t = T$ , на протязі якого, як правило, можуть виникати відмови даного виробу,  $P(t) \rightarrow 0$ . Це характерно для таких відмов, які легко усунути і які не призводять до важких наслідків (заміна ріжучого інструменту, орієнтація деталі, що заклинила, тощо).

В цьому випадку характеристикою безвідмовності може служити провідна функція  $\Omega(t)$  – середня кількість відмов (математичне сподівання числа відмов) за час  $t$  або параметр потоку відмов  $\omega$ :

$$\omega = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_{сеп}},$$

де  $T_{сеп}$  – напрацювання на відмову – відношення сумарної тривалості роботи (напрацювання) виробу до кількості відмов, що виникла за цей період (тобто середня тривалість безвідмовної роботи виробу).

Параметр потоку відмов – це середнє число відмов виробу за одиницю часу.

Другий граничний випадок, коли важко безпосередньо застосовувати  $P(t)$  виникає при оцінці безвідмовної роботи високонадійних виробів, коли значення



$P(t)$  близьке до одиниці або дорівнює їй. Створення виробів з показником  $P(t) = 1$  можливе при наявності значного запасу надійності.

Цей запас може бути визначений, якщо оцінюються фізичні процеси, що призводять до відмови виробу і для даних умов експлуатації визначається максимально можлива швидкість даного процесу.

Нехай відомо, що за даний період часу,  $t = T_0$  параметр виробу  $X$  може приймати різноманітні значення, оскільки є випадковою величиною, але його екстремальне значення за даний період часу буде  $X_{ек}$  (див. рис. 1.2). Це значення визначене наприклад з оцінки швидкості зносу спряження для найбільш несприятливих умов експлуатації.

Тоді, якщо значення параметру, при якому настане відмова виробу буде  $X_{max} > X_{ек}$ , запас надійності  $K_n$  можна порахувати як:

$$K_n = \frac{X_{max}}{X_{ек}} \geq 1.$$

або, як відношення  $X_{max}$  до такого значення параметра  $X_\gamma$ , при якому з ймовірністю  $\gamma$  параметр не вийде за дані межі, тобто:

$$K_n = \frac{X_{max}}{X_\gamma}.$$

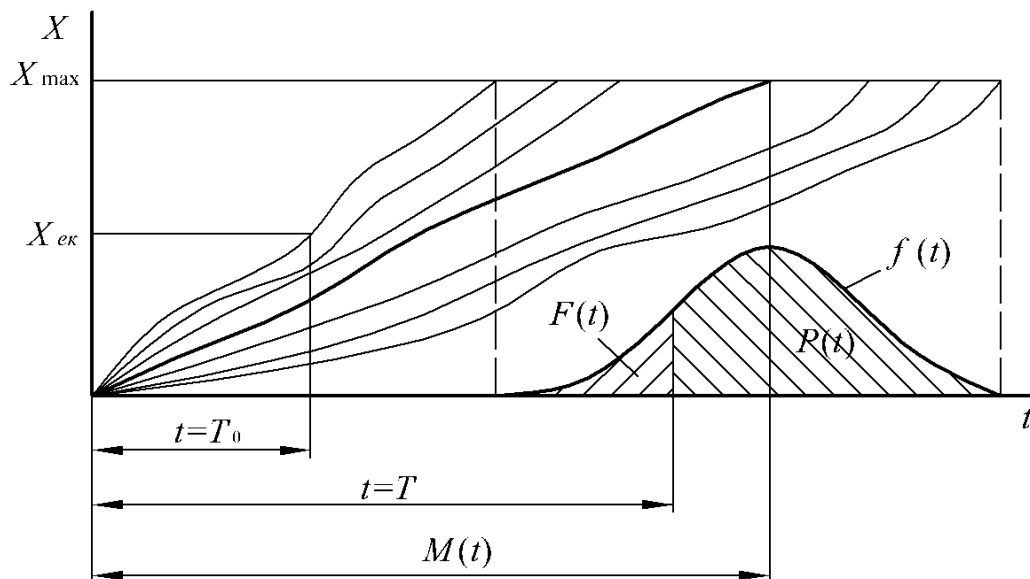


Рисунок 1.2 – Формування закону розподілу терміну безвідмовної роботи

При роботі виробу відбувається зміна його працездатності, тому запас надійності є функцією часу  $K_n(t)$ , і, як правило, зменшується в процесі експлуатації машини. Показником надійності також може служити швидкість зміни запасу надійності:

$$\gamma_n = \frac{dK_n}{dt}.$$

### 1.5. Показники оцінки довговічності виробу

Показники довговічності виробу оцінюють втрату працездатності виробу за весь період його експлуатації. Розрізняють довговічність виробу в цілому і довговічність його елемента.

Основним показником довговічності елемента виробу є його термін служби (напрацювання) до відмови  $T$ .

Значення  $T$  визначається гранично допустимою величиною вихідного параметра  $X = X_{\max}$  і деяким випадковим процесом втрати працездатності  $X(f)$  (зношування, корозія). Термін служби до відмови є випадковою величиною і характеризується певним законом розподілу, наприклад, щільністю ймовірності  $f(t)$  рис. 2.1 та числовими характеристиками: математичним сподіванням  $M(t)$ , дисперсією  $D = \sigma^2$  та ін.

Якщо ймовірність  $P(t)$  безвідмовної роботи регламентована, то значення  $T$ , що йому відповідає, перетворюється в не випадкову величину – гама-процентний ресурс. Термін служби  $T_p$  також не випадкова величина і в тому випадку, коли його значення задане виходячи з певних умов, наприклад, виходячи з системи ремонту.

Після періоду роботи  $t = T_p$  деталь або виріб повинні ремонтуватись або замінюватись, хоча в більшості випадків дана деталь має потенційну працездатність.

Граничний стан всієї машини, коли припиняється її експлуатація, визначається економічними факторами її моральним зносом або затратами, що пов'язані з фізичним зносом машини.

*Моральний знос* машини викликається тим, що її споживацька вартість стає нижчою, ніж допустимий рівень для даної галузі.

*Фізичний знос* проводить до зростання затрат на експлуатацію вище допустимого рівня і обумовлює доцільність подальшої експлуатації машини.

Для оцінки довговічності виробу використовують дві категорії показників:

По-перше, це показники, що характеризують вихід за допустимі межі основних технічних характеристик (вихідних параметрів) виробу в цілому. В цьому випадку основним показником довговічності буде ресурс (або термін служби).

По-друге, довговічність всієї машини повинна характеризувати її спроможність виконувати свої робочі функції з мінімальними затратами на заміну зношених деталей, ремонт і обслуговування.

Чим менші затрати часу і коштів, що йдуть на відновлення працездатності на протязі всього періоду експлуатації, тим вона довговічніша.

Для оцінки довговічності машини використовують *коефіцієнт технічного використання*  $K_{тв}$ , що визначається як:

$$K_{тв} = \frac{T_{роб}}{T_{роб} + \sum_{i=1}^n T_{рем i}},$$

де  $T_{роб}$  – час роботи машини за певний період експлуатації;

$\sum_{i=1}^n T_{рем i}$  – сумарна тривалість роботи машини за той самий період експлуатації.

Коефіцієнт технічного використання знаходиться в межах  $0 < K_{тв} < 1$  і дорівнює ймовірності того, що в даний довільно взятий момент часу машина працює, а не ремонтується.

Коефіцієнт технічного використання взятий за період між плановими ремонтами і технічними обслуговуваннями називають *коефіцієнтом готовності*  $K_2$ , який оцінює непередбачені зупинки машини, наявність яких свідчить про те, що планові ремонти і ТО не повністю виконують свою роль.

$K_2$  дорівнює ймовірності того, що виріб буде працездатним в проміжках між ремонтно-профілактичними заходами.

Основним показником довговічності виробу є коефіцієнт довговічності  $K_d$ , який дорівнює  $K_{me}$  взятому за весь період експлуатації.

Для визначення коефіцієнта довговічності необхідно встановити його залежність від термінів служби елементів виробу.

Час простою через ремонт  $i$ -ї деталі або вузла машини дорівнює:

$$T_{рем\ i} = \frac{T_{роб}}{T_i} \cdot \tau_i,$$

де  $T_i$  – термін служби (напрацювання) до відмови  $i$ -ї деталі (вузла) машини.

$\tau$  – тривалість (трудомісткість) ремонту.

$$K_d = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i}}.$$

З формули випливає, що основним методом підвищення довговічності виробу є скорочення часу, що затрачається на ремонт і підвищення терміну служби його деталей.

### 1.6. Економічні показники надійності

Показником надійності з економічної точки зору, може служити сума затрат, пов'язаних з виготовленням і експлуатацією машини, віднесемо до тривалості її експлуатації:

$$K_e = \frac{Q_v + Q_e}{T_e},$$

де  $Q_v$  – вартість виготовлення нової машини, грн.;

$Q_e$  – сумарні витрати на експлуатацію, ремонт і ТО, грн;

$T_e$  – період експлуатації машини, год.

Необхідно прагнути до мінімального значення цього показника за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між виробництвом і експлуатацією. Тому що чим дешевший виріб, тим більше затрат вимагає його експлуатація.

Співвідношення між вартістю виготовлення і експлуатації машини характеризується коефіцієнтом експлуатаційних видатків:

$$K_{ев} = \frac{Q_a}{Q_a + Q_e} \leq 1.$$

### 1.7. Класифікація машин за надійністю

Машини за надійністю класифікуються з двох точок зору.

По-перше, за наслідками до яких може призвести відмова (табл. 1.1), і по-друге, за тими причинами, які викликають необхідність відновлювати втрачену в процесі експлуатації працездатність.

Таким чином, класифікація стосується двох основних складових надійності – безвідмовності та довговічності.

Таблиця 1.1 – Класифікація машин за наслідками відмови

Наслідки відмов		Допустима P(t)	Тип машини
Катастрофічні	Серйозна аварія. Катастрофа. Невиконання відповідального завдання.	$P(t) \rightarrow 1$	Літальні апарати. Піднімально-транспортні машини. Військова техніка. Машини хімічних виробництв. Медичне обладнання.
Економічні витрати	Підвищення простоїв в ремонті. Робота на понижених режимах або з погіршеними параметрами.	Значні витрати $P(t) \geq 0,99$ .  Незначні витрати $P(t) \geq 0,9$ .	Технічне обладнання.  Сільськогосподарські. Побутові.
Без наслідків (затрати на ремонт в межах норми)		$P(t) < 0,9$	Окремі вузли і елементи машин

Безвідмовність машини в основному визначається роботою найбільш відповідальних вузлів та систем, оскільки у будь якій машині є вузли, вихід з ладу яких не призводить до недопустимих наслідків. Наприклад, під час польоту літака відмовив один з його вузлів. Якщо це шасі, то наслідки можуть бути катастрофічними, якщо знизиться ККД двигуна – то будуть економічні втрати, якщо вийшло з ладу крісло пасажира, то наслідки практично відсутні.

При класифікації машин за довговічністю (табл. 1.2) в першу чергу вказуються причини, пов'язані з вихідними параметрами машини, які призводять до необхідності ремонту чи обслуговування.

Під час призначення показників для оцінки надійності машини, а також під час вирішення питань щодо підвищення її безвідмовності загальний методологічний підхід повинен враховувати специфічні особливості конструкції машини та методи її експлуатації.

Таблиця 1.2 – Класифікація машин за довговічністю

Категорія машини	Призначення	Тип машини	Основні параметри, що визначають працездатність
Технологічні	Зміна форми і властивостей об'єктів праці	Верстати, преси, зварювальні агрегати, текстильні, харчові, поліграфічні, сільськогосподарські	Якість продукції, продуктивність
Хіміко-технологічні	Одержання нових матеріалів	Машини хімічної промисловості, металургійні комплекси	Якість продукції, продуктивність, безпечність
Транспортні	Переміщення об'єкта	Автомобілі, літаки, залізничний і водний	Швидкість, безпечність,

		транспорт, піднімально- транспортні машини	вантажо- підйомність
Енергетичні	Перетворення одного виду енергії в інший	Електродвигуни, генератори, двигуни внутрішнього згорання, реактивні двигуни, турбіни	ККД, потужність
Контрольно- вимірювальні	Контроль параметрів об'єкта	Вимірні прилади, сортувальні автомати, випробувальні машини	Точність вимірів
Обчислювальні	Розв'язання задач	ЕОМ	Правильність рішень
Військові	Ураження об'єкта	Гармати, ракети, танки, військова авіація	Виконання бойової задачі
Медичні	Відновлення здоров'я людини	Штучні органи (серце, нирка, легені), медичні апарати	Точність функціонування, надійність

## ТЕМА 2. ПРИЧИНИ ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

В процесі експлуатації на машину діють всі види енергії, що може призвести до змін параметрів окремих елементів, механізмів і машин в цілому.

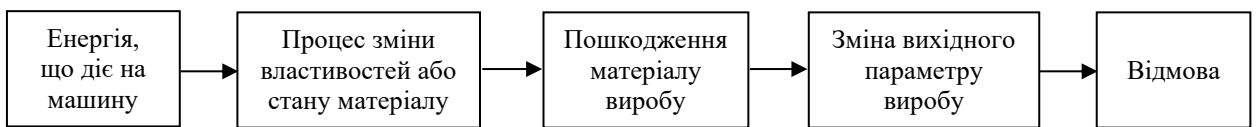
Є три основних джерела впливів:

- дія енергії зовнішнього середовища, включаючи людину, що виконує функції оператора;
- внутрішні джерела енергії, що пов'язані з робочими процесами, які протікають в машині або її механізмах;
- потенційна енергія, що накопичена в матеріалах і деталях машини.

При роботі машини мають місце наступні основні види енергії.

*Механічна* енергія, яка не тільки передається всіма ланками машини в процесі роботи, і впливає на неї у вигляді статичних або динамічних навантажень від взаємодії з основним середовищем.

*Теплова* енергія діє на машину при коливаннях температури навколишнього середовища, або при здійсненні робочого процесу (ДВЗ, технологічні машини), при роботі привідних механізмів, електротехнічних і гідравлічних пристроїв, а також ядерна, електромагнітна енергія та біологічні фактори.



## 2.1. Класифікація відмов

*Поступові відмови* виникають в результаті протікання того чи іншого процесу, що погіршує початкові параметри виробу.

Основною ознакою поступової відмови є те, що ймовірність її виникнення  $F(t)$  на протязі заданого періоду часу від  $t_1$  до  $t_2$  залежить від тривалості попередньої роботи виробу  $t_1$ .

Чим довше експлуатувався виріб, тим вища ймовірність виникнення відмови. До цього виду відноситься більшість відмов машини.

*Раптові відмови* виникають в результаті спільної дії певних факторів і випадкових зовнішніх впливів, що перевищують можливості виробу їм протистояти.

Відмова виникає через деякий проміжок часу  $T_0$ , який є випадковою величиною. Основною ознакою раптової відмови є незалежність ймовірності її виникнення  $F(t)$  на протязі заданого проміжку часу  $t_1$  до  $t_2$  від тривалості попередньої роботи виробу  $t_1$ .

Прикладами таких відмов є теплові тріщини, що виникли в деталі через відсутність мастила, поломки деталей в результаті перевантаження або



неправильної експлуатації. Вихід з ладу при цьому відбувається несподівано, без попередніх симптомів руйнування.

Наприклад, вихід з ладу автомобільної шини може бути як її знос в результаті попередньої експлуатації, так і її прокол.

Поява будь-якої відмови залежить від швидкості  $\gamma$  процесу пошкодження і від часу початку виникнення цього процесу  $T_e$ .

$$\gamma = \frac{dU}{dt},$$

де  $U$  – ступінь пошкодження, .

Для поступової відмови  $T_e = 0$ , тобто при експлуатації виробу процес починається відразу, а швидкість процесу є функцією часу  $\gamma(t)$ .

Для раптової відмови час її виникнення  $T_e$  є випадковою величиною, яка підпорядковується певному закону розподілу  $f(T_e)$ , що не залежить від стану виробу. Процес проходить дуже швидко  $\gamma \rightarrow \infty$ , тому функція  $f(T_e)$  визначає ймовірність безвідмовної роботи.

Можливий і третій вид відмов, який включає в себе особливості двох попередніх. Він називається складним. Тут час виникнення відмови  $T_e$  випадкова величина, що не залежить від стану виробу, а швидкість процесу втрати працездатності виробу  $\gamma(t)$  залежить від його запасу міцності. Наприклад, зовнішній недопустимий ударний вплив на машину, може бути джерелом виникнення втомної тріщини через концентрацію напружень. Розвиток тріщини буде проходити при подальшій експлуатації машини.

На рис. 2.1 представлено схеми виникнення основних видів відмов.

*Відмова функціонування* призводить до того, що виріб не може виконувати свої функції (поломка, заклинювання).

*Параметрична відмова* призводить до виходу параметрів виробу за допустимі межі (точність, продуктивність).

Для сучасних машин найбільш характерні параметричні відмови. Це пов'язано з підвищенням вимог до параметрів виробів. Експлуатація виробу, що має параметричну відмову може призвести до важких економічних та інших наслідків.

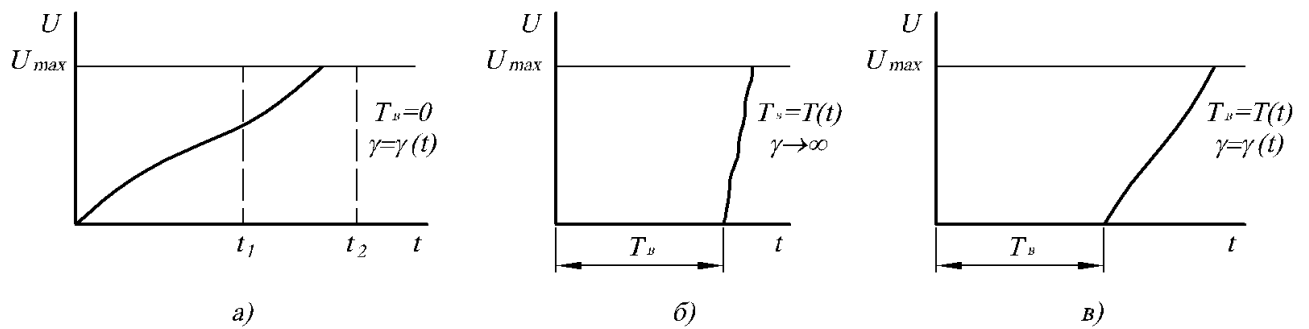


Рисунок 2.1 – Схеми виникнення основних видів відмов:

а – поступова (зносова); б – раптова; в – складна.

В складних машинах і системах параметричні відмови можуть призвести до відмов функціонування.

*Допустимі* відмови пов'язані з процесами старіння, що призводять до поступового погіршення вихідних параметрів.

*Недопустимі* відмови пов'язані з порушенням наступних умов виробництва і експлуатації:

- порушення ТУ при виготовленні і складанні;
- порушення правил та умов експлуатації і ремонту.

За причинами виникнення відмови можна розділити на *конструктивні*, що викликані недоліками конструкції; *технологічні*, що викликані недосконалістю або порушенням технології, і *експлуатаційні*, що викликані невірною експлуатацією.

За своїми наслідками відмови можуть бути *легкими*, які можна легко усунути, *середніми*, що не викликають руйнування окремих вузлів, і *важкими*, які викликають важкі вторинні руйнування, а іноді і загибель людей.

За можливістю подальшого використання виробу відмови поділяють на *повні*, що виключають можливість роботи виробу до їх усунення і *часткові*, при яких виріб може частково використовуватись.

За часом виникнення: *відмови припрацювання*, *нормальної експлуатації*, *зносові*.

## **2.2. Допустимі і недопустимі види пошкоджень**

При роботі машини відмова може виникнути в результаті поломки деталей, їх деформації, зносу, або пластичної деформації поверхневих шарів, теплових тріщин, корозії тощо.

Види пошкоджень і відповідно відмови можна розбити на дві групи: допустимі (за характером, а не за величиною), що викликають в нормальних умовах експлуатації і, недопустимі, що мають аварійний характер.

До *допустимих* відносяться короблення деталі, в деяких випадках поломка в результаті втоми, окремі види зносу, втома поверхневих шарів.

До *недопустимих* відносяться поломки деталей з причини недостатньої статичної, динамічної і втомної міцності, теплові тріщини в результаті нагріву деталі, в ряді випадків корозія.

Поділ пошкоджень на допустимі і недопустимі залежить не тільки від характеру пошкоджень, але і від вимог, що висуваються до даного виробу і від можливості запобігти даному процесу.

Наприклад, корозія – допустимий вид пошкоджень для корпусів морських суден і недопустимі для направляючих станини верстатів.

Всі пошкодження повинні бути усунені певними методами. Допустимі пошкодження, як правило, повністю усунути неможливо, можна лише зменшити їх прояв.

Види пошкоджень визначають вид ремонту. Допустимі пошкодження усуваються за допомогою планового ремонту, а недопустимі – в ході аварійного.

## **2.3. Параметрична надійність машин**

Ряд процесів в машині можуть призвести до відмов, які пов'язані не з виходом з ладу деталей і спряжень, а з погіршенням характеристик виробів.

В сучасних машинах надійність їх роботи визначається в першу чергу зміною вихідних параметрів під впливом певних процесів.

В складних машинах і системах вимоги до вихідних параметрів встановлюють як для машин в цілому, так і для окремих її елементів. При цьому

значення вихідних параметрів машини залежить від параметрів, що характеризують стан її окремих вузлів.

Вихід параметрів вузла за допустимі межі означає необхідність його заміни, ремонту або регулювання, тобто зупинки всієї машини. Тому параметрична відмова елементу або частини машини означає відмову функціонування для всієї машини або системи.

### ТЕМА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ

#### 3.1. Зміна властивостей і стану матеріалів

Зміна початкових властивостей і стану матеріалів з яких виконано виріб є першопричиною втрати ним працездатності, оскільки ці зміни можуть призвести до пошкодження виробу і до небезпеки виникнення відмови.

Чим досконаліше вивчені закономірності, які описують процеси зміни властивостей і стану матеріалів, тим достовірніше можна прогнозувати поведінку виробу в даних умовах експлуатації і забезпечити збереження показників надійності в необхідних межах.

В основі втрати машиною працездатності завжди лежать фізичні закони, але через велику різноманітність і перемінність діючих факторів, ці залежності мають імовірнісний характер.

Швидкість деякого процесу пошкодження матеріалу  $\gamma$  є функцією цілого ряду параметрів  $z_1, z_2, z_3$  і часу  $t$ ,

$$\gamma = \frac{dU}{dt} = \phi(z_1; z_2; \dots; z_n; t)$$

Параметри  $z$  характеризують умови експлуатації (навантаження, швидкість, температуру) – зовнішні фактори і стан матеріалу (твердість, міцність, якість мікроструктури та поверхневого шару) – внутрішні фактори, що впливають на протікання процесу пошкодження матеріалу.

Знання фізичної закономірності процесу дає значно кращі можливості оцінки процесу у порівнянні з оцінкою цього процесу лише на основі статистичних спостережень.

Функціональна залежність зазвичай абстрагує дійсність і відображає фізичну суть процесу з певним ступенем наближення, але в той самий час дозволяє передбачити можливий хід процесу при різноманітних ситуаціях.

Так, підстановка в рівняння середніх значень аргументів дає уяву про математичне сподівання випадкової функції, що описує процес, а за дисперсією випадкових аргументів можна оцінити дисперсію випадкового процесу.

### 3.2. Фізична природа виникнення відмов

Як фізичні закони, так і одержані на їх основі часткові залежності, що описують зміну властивостей і стану матеріалів, можна розділити на дві основні групи.

По-перше, це закономірності, що описують взаємозв'язки процесів, які не є незворотними, коли після припинення дії зовнішніх факторів матеріал (деталь) повертається до вихідного стану. Ці залежності називають *законами стану*.

По-друге, є закономірності, які описують незворотні процеси і, відповідно, дозволяють оцінити ті зміни початкових властивостей матеріалу, які відбуваються в процесі експлуатації виробу. Ці залежності називають *законами старіння*.

Закони стану поділяються на *статичні*, коли у функціональну залежність, що описує зв'язок між вхідними і вихідними параметрами, фактор часу не входить, і на *перехідні процеси*, де враховується зміна вихідних параметрів у часі.

Типовими законами статичних законів стану є закон Гука, закон теплового розширення твердих тіл та інші.

Так, для найпростішого випадку визначення деформації  $\Delta l$  однорідного стержня довжиною  $l$ , який розігріто до надлишкової температури  $\theta$ , при його розтягненні силою  $P$  одержимо:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} + l\alpha\theta,$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу стержня;

$F$  – площа поперечного перерізу;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стержня.

Після зняття зовнішніх впливів (температури і навантаження) стержень повернеться у вихідне положення ( $\Delta l = 0$ ). Якщо стержень є елементом конструкції, то його деформація не повинна перевищувати допустимого значення  $\Delta l < \Delta l_{\text{доп}}$ .

Статичні закони, які описують зміни стану виробу, хоч і не включають фактор часу, можуть бути використані для розрахунків надійності, якщо відомі зміни характеристик виробу в процесі експлуатації.

Так, якщо з причини зносу окремих спряжень машини через деякий час збільшується тепловиділення і зростають навантаження в окремих ланках, тобто  $\theta = \theta(t)$  і  $P = P(t)$ , то відповідно буде змінюватись і деформація  $\Delta l(t)$ , яка може бути визначена за допомогою вищезгаданої формули.

Закони стану, що описують перехідні процеси, наприклад, коливання пружних систем, процеси теплопередачі та інші хоча і враховують фактор часу, але не враховують тих змін, що відбуваються при експлуатації виробу. Зазвичай вони відносяться до категорії процесів, що протікають швидко, або процесів середньої швидкості. Лише при відомій зміні рівня зовнішніх впливів їх можна використовувати для вирішення задач надійності.

### **3.3. Закони старіння**

Для оцінки втрати виробом працездатності головне значення мають закони старіння, які розкривають фізичну суть незворотних змін, що протікають в матеріалах виробу.

Хоча закони старіння завжди пов'язані з факторами часу, у деяких із них час безпосередньо не фігурує, а враховується вплив інших факторів (наприклад енергії), яка в свою чергу проявляється в часі. Такі залежності називають законами перетворення. Типовим прикладом законів перетворення можуть служити залежності, що описують процеси корозії. Вивести залежності, які безпосередньо відображають зміну величини корозії в часі досить важко, оскільки велика кількість факторів протилежно впливає на інтенсивність пошкодження, а сама корозія може мати багато проявів (рівномірна, місцева, міжкристалічна).

Закони старіння, що оцінюють ступінь пошкодження матеріалу у функції часу дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, оцінювати можливі його реалізації і виявляти найбільш вагомні фактори, які впливають на інтенсивність процесу.

Типовим прикладом таких залежностей є закони зношування матеріалів, які на основі розкриття фізичної картини взаємодії поверхонь дають методи для розрахунку інтенсивності процесу зношування, або величини зносу у функції часу і оцінюють параметри, що впливають на хід процесу.

### **3.4. Поверхневий шар і його параметри**

Будова поверхневого шару і його стан визначають процеси, що виникають при взаємодії з іншим тілом або з навколишнім середовищем, наприклад, при зношуванні, контактній деформації, втомі, корозії та ін. Крім того, багато видів руйнувань всього тіла деталі починається з поверхні і залежить від її стану.

Вплив параметрів поверхневого шару на працездатність деталі викликаний наступними причинами:

1. Поверхневі шари твердого тіла мають надлишок енергії, оскільки молекули і атоми, що знаходяться біля поверхні мають вільні зв'язки, які сприяють виникненню таких явищ як поглинання (адсорбція), зчеплення (когезія), прилипання (адгезія), та інших видів взаємодії з об'єктами зовнішнього середовища.

2. Поверхневий шар формується в результаті різноманітних технологічних процесів, які не тільки утворюють необхідну форму поверхні і змінюють властивості матеріалу, але і викликають рід побічних явищ біля його поверхні. Фізико-хімічні параметри поверхневого шару, його структура і напружений стан, як правило, відчутно відрізняються від властивостей всього матеріалу

3. В процесі експлуатації відбувається безперервна зміна параметрів поверхневого шару, зі значно вищою інтенсивністю, ніж зміни, що відбуваються у решті об'єму.

Тому більшість відмов пов'язані з процесами, що протікають в поверхневих шарах і їх природа не може бути пояснена без аналізу тих змін, які відбуваються в поверхневому шарі під час експлуатації виробу.

### **3.5. Поверхневі явища, при наявності змащування**

Для характеристики стану поверхневого шару необхідно враховувати поверхневі явища, які мають місце при наявності змащувальних і поверхнево-активних речовин. Шар мастила утворює біля поверхні твердого тіла особливу структуру.

Змащувальні речовини утворюють тонкі плівки газів, парів з орієнтованими шарами молекул, які адсорбуються на поверхні твердого тіла.

Адсорбційні плівки призводять до ефекту пластифікації, тобто полегшують пластичну текучість зерен, що розміщені у поверхневому шарі, оскільки адсорбований шар знижує поверхневий натяг металу.

Крім того, потрапляючи в мікротріщини, мастило чинить розклинюючу дію і може знизити міцність твердого тіла.

Таким чином, поверхневі шари твердого тіла мають складну структуру в наслідок процесів виробництва і процесів взаємодії з навколишнім середовищем при експлуатації виробу.

Параметри, які характеризують стан поверхні, включають її геометричні, механічні, фізичні, хімічні структури та інші показники і їх зміни в процесі експлуатації при протіканні різноманітних процесів старіння, багато в чому визначають надійність виробу.

### **3.6. Класифікація процесів старіння**

Оскільки процеси старіння характеризуються складними та різноманітними явищами, що відбуваються у матеріалах деталей машин, їх класифікацію доцільно проводити в залежності від зовнішніх проявів до яких призвів даний процес. За зовнішнім прояву процесу (деформація, знос, зміна властивостей) можна судити про ступінь пошкодження матеріалу деталі, а також оцінити близькість виробу до граничного стану.



Класифікуючи незворотні процеси старіння, необхідно також визначити ту зону, в якій проявляється даний процес, тобто, чи він охоплює весь об'єм матеріалу деталі, чи проявляється лише у поверхневих шарах чи протікає при контакті двох спряжених поверхонь.

В табл. 3.1. приведена класифікація процесів старіння за їх зовнішнім проявом та вказані основні різновиди кожного процесу

Таблиця 3.1 – Класифікація процесів старіння за їх зовнішнім проявом

Об'єкт		Зовнішній прояв процесу	Різновиди процесу
Тіло деталі (об'ємні явища)		Руйнування	Крихке руйнування, в'язке руйнування
		Деформація	Пластична деформація, короблення
		Зміна властивостей матеріалу	Зміна: структури, механічних властивостей, хімічного складу, магнітних властивостей, газопроникливості, забрудненість рідини (паливо, мастило)
Поверхня деталі (поверхневі явища)	Деталь	Роз'їдання	Корозія, ерозія, кавітація, прогар, утворення тріщин
		Наріст	Налипання (адгезія, когезія, адсорбція, дифузія), нагар
		Зміна властивостей поверхневого шару	Зміна: шорсткості, твердості, відбиваючої спроможності, напруженого стану
	Пара	Знос	Знос (стирання), втома поверхневих шарів, зминання, перенос матеріалу

		Зміна умов контакту	Зміна: площі контакту, глибини проникнення мікронерівностей, суцільності змащувального шару
--	--	---------------------	---

### 3.7. Типові закономірності протікання процесів старіння

Оцінка швидкості протікання процесу пошкодження деталі в часі  $\gamma = \frac{dU}{dt}$  є необхідним етапом при розв'язанні задач надійності. Знаючи часову характеристику  $\gamma(t)$  можна визначити ступінь пошкодження як функцію часу, яка, в свою чергу буде визначати зміни у часі вихідного параметра виробу

$$U(t) = \int_0^t \gamma(t) dt.$$

Оскільки при старінні відбуваються незворотні процеси, то залежність, як правило, буде монотонно неспадаючою функцією. Виключенням є випадок, коли ступінь пошкодження характеризується зміною фізико-хімічного фактору, що оцінює властивість матеріалу: твердість, границя міцності, хімічний склад, структура. В цьому випадку величина пошкодження  $U$  може як зростати, так і спадати, а швидкість процесу змінювати знак.

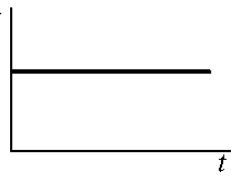
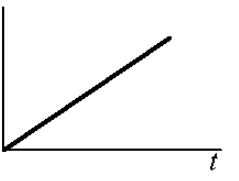
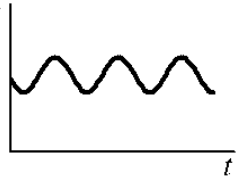
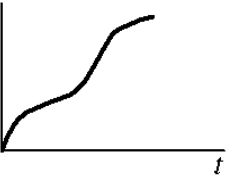


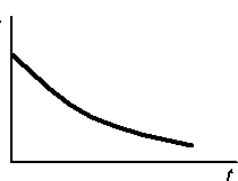
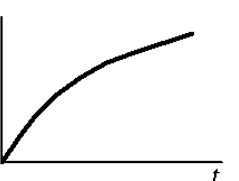
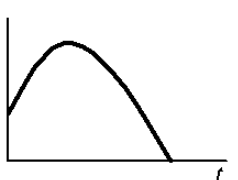
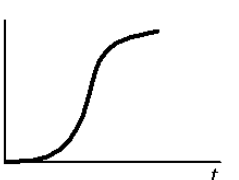
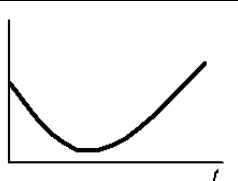

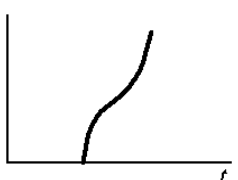
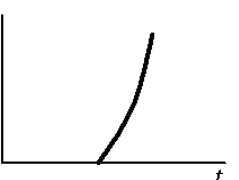
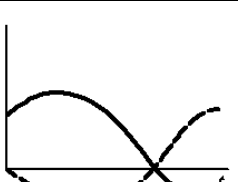

Слід пам'ятати, що процеси старіння є випадковими і закономірність їх протікання – це математичне сподівання даної випадкової функції або її реалізації.

Типові закономірності протікання процесів старіння у часі, що представлені в таблиці 3.2 відносяться до одностадійних процесів, коли на протязі періоду, який розглядає фізико-хімічна картина процесу не змінюється.

Найбільш просто протікають стаціонарні процеси, коли швидкість процесу постійна, або коливається відносно середнього значення. Це відбувається у випадку коли всі фактори, що впливають на інтенсивність процесу стабілізувались.

В цьому випадку залежність  $U(t)$  має лінійний, або близький до нього характер.

Таблиця 3.2 – Типові закономірності протікання в часі процесів старіння

Процеси за $\gamma$ характеристикою		$\gamma(t) = \frac{dU}{dt}$	$U(t)$	Приклади
Стационарні	Постійні			Знос $U = kt$
	Псевдо-стационарні			Знос при змінних режимах
Монотонні	Зростаючі			Знос при засміченні поверхонь $U = kt^n, n \geq 1$ $U = A(e^{kt} - 1)$
	Спадаючі			Знос в період припрацювання $U = kt^n, n \leq 1$ $U = A(1 - e^{-kt})$
Екстремальні	З максимумом			Корозія, короблення $\gamma = ate^{-bt}$
	З мінімумом			Повзучість, знос, корозія
Із запізненням				Втома, крихке руйнування
Знакозмінні				Зміна механічних характеристик

Якщо при старінні виникають фактори, які прискорюють або уповільнюють швидкість протікання зносу, тобто  $\gamma$  змінюється монотонно,

функція  $U(t)$  буде мати нелінійний вид і буде описувати інтенсифікацію або затухання процесу пошкодження матеріалу.

Наприклад, збільшення зносу спряження призводить до росту зазорів і відповідно динамічних навантажень, що інтенсифікують процес. В цьому випадку перебіг процесу пов'язаний не тільки із зовнішніми факторами, але і з ступенем пошкодження. Ця умова може бути записана так  $\frac{dU}{dt} = f(U)$ .

В окремих випадках, коли на швидкість процесу одночасно діє ряд рівноцінних факторів, що змінюються в часі, залежність  $\gamma(t)$  може мати екстремум (максимум або мінімум), що характерно для деяких видів корозії, процесів короблення. В цьому випадку функція  $U(t)$  має точку перегину. При досягненні максимуму і подальшому падінні  $\gamma$  до нуля процес пошкодження припиняється. Така залежність характерна для перерозподілу внутрішніх напружень і деформацій у відливках в процесі їх експлуатації. Після певного періоду, який триває декілька років, процес короблення припиняється.

Існує категорія процесів, для яких спочатку відбувається накопичення певних внутрішніх напружень, а потім, з деяким запізненням, відбувається реалізація процесу. Така картина характерна для випадків, коли використовуються залежності, що не повністю відображають внутрішні зв'язки між ступенем пошкодження і причинами, що їх викликає. Хоча процес пошкодження відбувається відразу, параметри, що оцінюють його величину, проявляються дещо пізніше. Наприклад, при втомних руйнуваннях матеріалу, тріщини зароджуються лише після певного числа циклів навантаження.

Якщо швидкість процесу змінює знак, що характерно для складних фізико-хімічних процесів, то функція  $U(t)$  буде мати екстремум.

#### **ТЕМА 4. ЗНОШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ**

*Зношування* – це процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виникає внаслідок відокремлення від поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації.

Класифікація видів зношування подана на рис. 4.1.

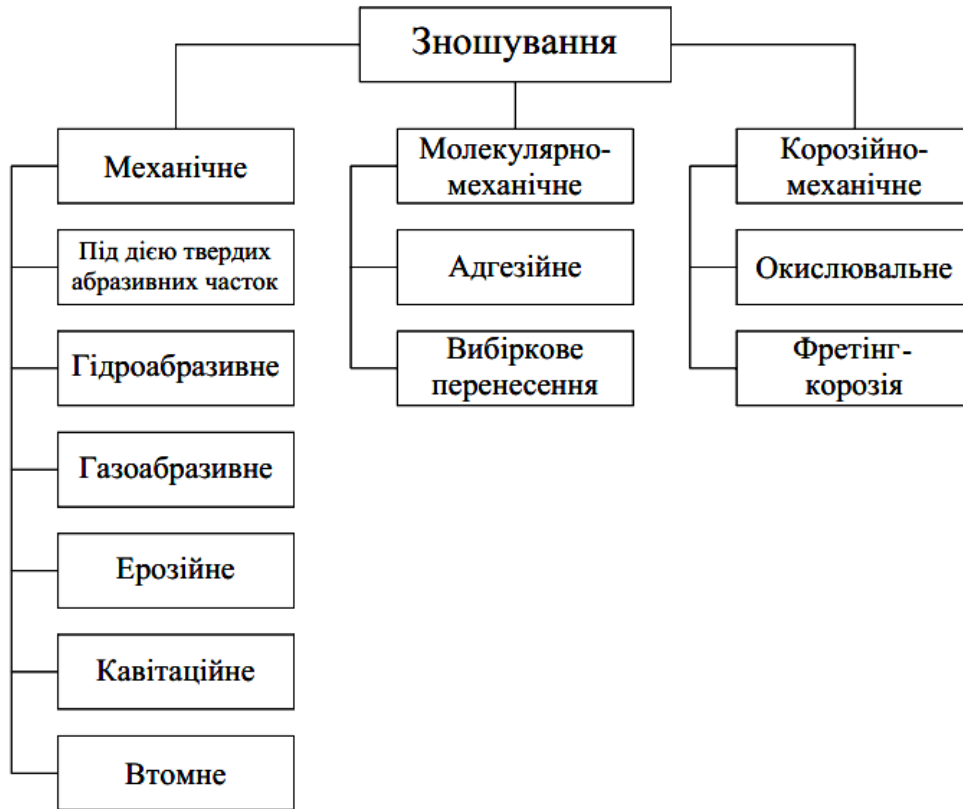


Рисунок 4.1 – Класифікація видів зношування

*Механічне зношування* є результатом дії сил тертя при ковзанні однієї деталі по поверхні іншої. При цьому виді зносу відбувається стирання (зрізання) поверхневого шару металу та спотворення геометричних розмірів у деталей, що працюють у парі.

*Зношування під дією твердих абразивних частинок* спостерігається в тих випадках, коли поверхні тертя забруднені дрібними абразивними та металевими частинками. Зазвичай такі частинки потрапляють на поверхні тертя при обробці на верстаті литих заготовок, в результаті зношування самих поверхонь, потрапляння пилу на поверхні контакту тощо. Вони тривалий час зберігають свої ріжучі властивості, утворюють на поверхнях деталей подрязини, задири, а також, змішуючись з брудом, виконують роль абразивної пасти, в результаті дії якої відбувається інтенсивне зношування поверхонь, що сполучаються.

*Гідроабразивне зношування* (з грецької hydro – вода і латини abrasion стирання, зношування) – це зміна розмірів, форми, маси або стану поверхні

матеріалу під впливом рідини, що рухається з розподіленими у її об'ємі включеннями твердих частинок.

*Газообразивне зношування* – це зміна розмірів, форми, маси або стану поверхні матеріалу під впливом газу, що рухається з розподіленими у його об'ємі включеннями твердих частинок.

*Ерозійне зношування* – це руйнування поверхні деталі внаслідок механічної дії високошвидкісного потоку рідини, газу або пару.

*Кавітаційне зношування* – це механічне зношування в умовах руху твердого тіла в рідині, під час якого бульбашки газу дезінтегруються (руйнуються, вибухають) поблизу поверхні, що призводить до створення локального високого ударного тиску чи високої температури. Кавітаційні руйнування мають локальний характер і проявляються в утворенні місцевих заглибин і каверн.

Кавітаційне зношування зумовлене тим, що у швидкісному потоці рідини при його звуженні або за наявності перешкоди на його шляху тиск може зменшитись до значення, яке відповідає тиску насиченої пари за даної температури. При цьому може статися розрив суцільного потоку. Порожнини, що утворюються, заповнюються парою або газами, які виділяються з рідини. Парогазові бульбашки розмірами порядку десятих часток міліметра, що утворилися, переміщуючись разом із потоком, потрапляють у зони високих тисків. Пара конденсується, гази розчиняються і в порожнину, що утворилася з великим прискоренням, потрапляють частинки рідини, відбувається відновлення суцільності потоку, яке супроводжується ударом.

Кавітаційне зношування проявляється в наступному. Під дією ударів поверхня металу починає деформуватися і піддаватися наклепу; з'являються лінії зсуву, проявляються межі окремих зерен. Багаторазово повторювані удари викликають знеміцнення і наклеп матеріалу на окремих мікроділянках, що супроводжуються зародженням тріщин. Руйнується у першу чергу найменш міцна структурна складова (в сталях – ферит, в чавунах – графітові включення). Потім може наступити викришування і міцніших компонентів. Руйнування

розвивається в межах зерен або на їх границях в залежності від міцності зерен та зв'язку між ними.

Агресивні середовища (наприклад, морська вода) сприяють збільшенню інтенсивності кавітаційного зношування. Швидкість кавітаційного зношування може в сотні разів і більше перевищувати швидкість корозійного руйнування поверхневого шару.

Інтенсивність кавітаційного зношування залежить від температури, властивостей рідини і матеріалу деталей. Вплив в'язкості рідини на кавітаційне зношування незначне. Зі збільшенням поверхневого натягу рідини зношування відбувається інтенсивніше.



Рисунок 4.2 – Пошкодження пластини клапана аксіально-поршневого гідронасоса в результаті кавітаційного зношування

Кавітаційному зношуванню (руйнуванню) підлягають трубопроводи, гідродвигуни, лопаті гідравлічних турбін і насосів, гребні гвинти, зовнішні поверхні циліндрів двигунів внутрішнього згорання тощо.

Явище кавітації викликає вібрації, удари та струшування, котрі призводять до ослаблення кріпильних елементів, обривання болтів, змінання різі, руйнування ущільнень і втомного руйнування з'єднань.

Кавітація зменшує ККД машин і гребних гвинтів і безпосередньо викликає руйнування поверхонь деталей у зоні її дії. Вона сприяє закупореною розпилювачів форсунок двигунів внутрішнього згорання.

Попередити кавітацію можна, проектуючи гідромеханічну систему так, щоб у всіх точках потоку тиск не був нижчим тиску пароутворення. Додавання у воду речовин, які утворюють емульсії (мастила й емульгатори), зменшує поверхневий натяг і, відповідно, кавітаційне зношування. Воді температурою 50°C відповідає найбільша інтенсивність зношування.

Відхилення від обтічної форми і нерівності, що утворилися внаслідок кавітаційного зношування, призводять до появи вихорів і відхилення струменів від стінок робочих каналів. Це сприяє виникненню або посиленню кавітації.

*Втомне зношування* є результатом дії на деталь знакозмінних навантажень, що викликають втому матеріалу деталі та її подальше руйнування. Втомні руйнування матеріалу деталі не обов'язково відразу призводять до її руйнування. Можливе виникнення втомних тріщин, лущення та інших дефектів, які також небезпечні, оскільки викликають прискорене зношування деталі і механізму. Для запобігання втомному руйнуванню важливо правильно вибрати форму поперечного перерізу деталі, що виготовляється або ремонтується: вона не повинна мати різких переходів від одного розміру до іншого. Слід також пам'ятати, що грубо оброблена поверхня, наявність рисок і подряпин можуть стати причиною виникнення втомних тріщин.

*Молекулярно-механічне зношування* підрозділяють на адгезійне зношування і вибіркоче перенесення.

*Адгезійне зношування* відбувається в зв'язку з виникненням на окремих ділянках контактуючих поверхонь молекулярних (адгезійних) взаємодій, сили яких перевершують міцність зв'язків поверхневого шару матеріалу з основним матеріалом деталі. Прояв атомно-молекулярних зв'язків залежить від властивостей матеріалів контактуючих поверхонь. До адгезійного зношування схильні пари з металевими поверхнями. Адгезійне зношування виражається в глибинному вирівнюванні матеріалу і перенесення його з однієї поверхні на іншу, що призводить, як правило, до заїдання деталей. Знос при заїдання може



виникнути в зубчастій парі або в опорах кочення при високих контактних навантаженнях і відсутності мастила.



Рисунок 4.3 – Пошкодження деталі в результаті втомного зношування

*Вибіркове перенесення* – це явище структурного пристосування металів при терті. До періодів вибіркового перенесення відносять два етапи: початковий і усталений. На початковому етапі при терті пари «сталь-сталь» відбувається виділення тепла, під дію якого окисляється мастильно-охолоджувальна суміш (50 % фреону й 50 % мастила). Кислоти, що утворилися при терті, розчиняють поверхню мідних трубок (по яких циркулює фреоно-змащуюча рідина) і переводять іони міді в змащення. Циркуюючи в системі, всередині холодильника, іони міді осідають у вигляді плівки на сталевих поверхнях тертя. На усталеному етапі, після виникнення мідної плівки виникає пара тертя мідь-мідь. За рахунок цього поліпшуються умови тертя, припиняється тепловиділення при терті й окислювання мастильно-охолоджувальної суміші і, як наслідок, припиняється розчинення мідних трубок. При порушенні суцільності плівки

режим тертя погіршується; це призводить до окислювання змащення, до додаткового розчинення міді, внаслідок чого захисна плівка відновлюється. Цей процес повторюється з певною періодичністю в міру руйнування захисної плівки.

Металева захисна плівка, що виникає на поверхнях тертя, називається сервовітною від латинського *servo-witte* – рятувати життя.

*Корозійно-механічне зношування* характерне для деталей, що знаходяться під безпосереднім впливом води, повітря, хімічних речовин, коливань температури. Наприклад, якщо температура повітря у виробничих приміщеннях нестійка, то щоразу при її підвищенні водяні пари, що містяться в повітрі, стикаючись з більш холодними металевими деталями, осідають на них у вигляді конденсату, що викликає корозію, тобто руйнування металу внаслідок хімічних і електрохімічних процесів, що розвиваються на його поверхні. Під впливом корозії в деталях утворюються глибокі роз'їдання, поверхня стає губчастою, втрачає механічну міцність. Ці явища спостерігаються, зокрема, у деталей гідравлічних пресів і парових молотів, що працюють у середовищі пари або води.

*Окислювальне зношування* характерне для випадку, коли на поверхнях дотику утворюються плівки оксидів. В процесі тертя ці оксиди руйнуються і знов утворюються, а продукти зносу складаються з оксидів. Від інших видів корозійно-механічного зношування воно відрізняється відсутністю агресивного середовища, протікає при нормальних і підвищених температурах при терті без змащувального матеріалу або при недостатній його кількості. Інтенсивність зношування може бути досить значною, але поверхня тертя зберігає малу шорсткість. Це пояснюється тим, що оксиди перешкоджають схоплюванню поверхонь. При звичайних температурах окислення поверхонь активізується пластичною деформацією. Тому одним з методів боротьби з окислювальним зношуванням є застосування поверхонь високої твердості.

Для окислювального зношування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями плівки був достатній для утворення плівки досить великої товщини. Природно, що у разі циклічного руйнування оксидів високої твердості, зношування носитиме характер абразивного.

Окислювальному зношуванню піддаються калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань тяги і важелі механізмів управління, шарнірно-болтові з'єднання підвісних пристроїв, що працюють без змащувального матеріалу, металеві колеса фрикційних передач і чашки варіаторів, а також деякі деталі в парах тертя кочення.

*Фретінг-корозія* – це процес руйнування щільно контактуючих поверхонь пар метал-метал або метал-неметал в результаті малих коливальних відносних переміщень.

Для збудження фреттінг-корозії достатні переміщення поверхонь з амплітудою 0,025 мкм. Руйнування полягає в утворенні на дотичних поверхнях дрібних каверн і продуктів корозії у вигляді нальоту, плям і порошку. Внаслідок малої амплітуди переміщення, пошкодження зосереджуються на невеликих ділянках дійсного контакту. Продукти зносу не можуть вийти із зони контакту, в результаті виникає високий тиск і збільшується їх абразивна дія на основний метал.

Якщо амплітуда коливального руху велика (близько 2,5 мм), то площа ураження фреттінг-корозією збільшується і картина зношування нагадує ту, яка спостерігається при ковзанні. Тому вважається, що амплітуда переміщення близько 2,5 мм є верхньою межею амплітуди для збудження фреттінг-корозії. Все сказане відноситься до незмащених поверхонь.



Рисунок 4.4 – Пошкодження деталей в результаті фретінг-корозії

Продукти фретінг-корозії сталевих виробів в атмосфері повітря мають колір від світло-червоно-коричневого до темно-коричневого залежно від марок матеріалів, тиску, вологості і частоти циклів мікрозсувів.

Інтенсивність зношування залежить від виду тертя, які можна класифікувати наступним чином (див. рис. 4.5).

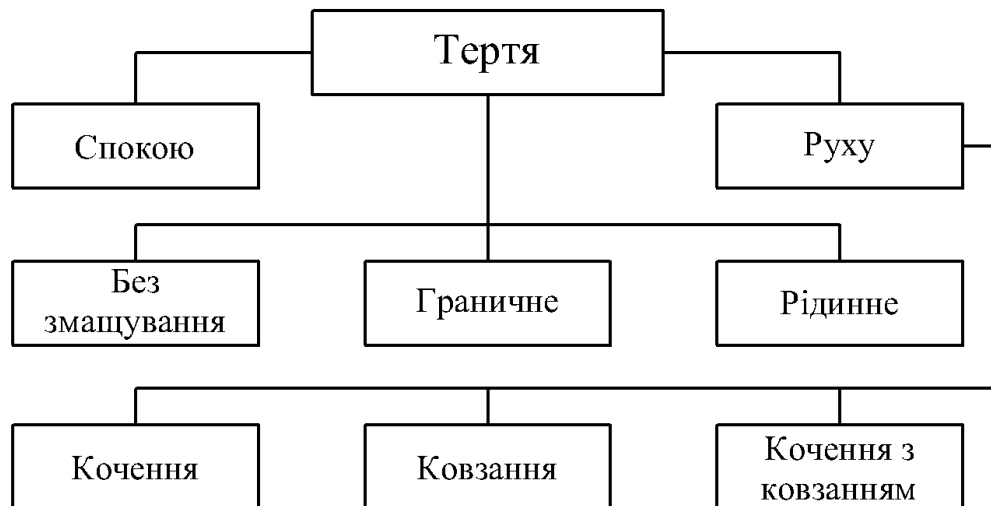


Рисунок 4.5 – Класифікація видів тертя

Костецький Б.І. в якості основних ознак класифікації руйнування рекомендує приймати до уваги механічні, фізичні, та хімічні процеси, що протікають в зоні контакту (див. рис. 4.6).

*Схоплювання I роду* – один з найбільш небезпечних видів пошкодження, що виникає при малих швидкостях взаємного переміщення деталей і тиску в парі  $P \geq \sigma_T$  на ділянці фізичного контакту при відсутності змащування чи захисних плівок окислів. При цьому виникають локальні зв'язки матеріалом, їх деформація і руйнування з відокремленням чи налипанням частинок металу.

*Схоплювання II роду* – це пошкодження пов'язане з утворенням місцевих металічних зв'язків, їх деформацією і руйнуванням з утворенням тріщини, адгезійного зношування, переносом та відокремленням частинок. Воно обумовлене розм'якшенням. Параметри схоплювання подано в таблиці 4.1.

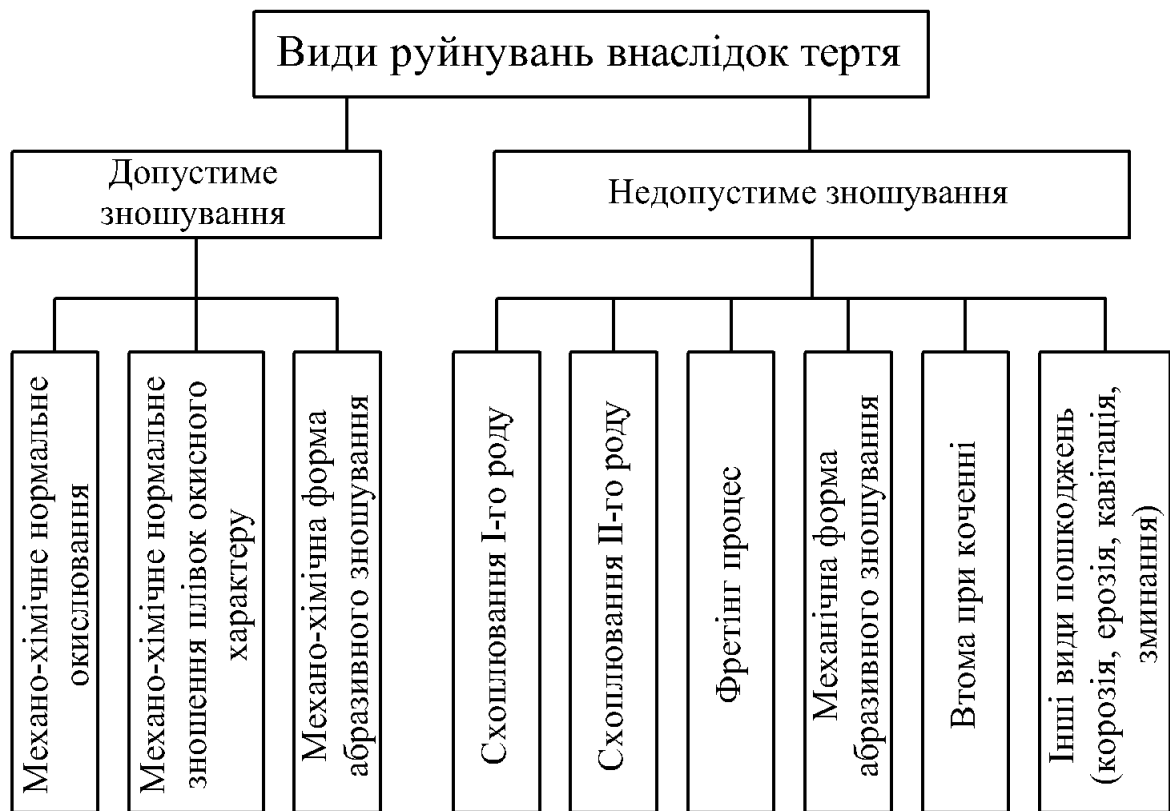


Рисунок 4.6 – Види руйнувань внаслідок тертя

Таблиця 4.1 – Параметри процесу схоплювання

Параметри	Схоплювання	
	I роду	II роду
Глибина шару руйнування, мм	до 0,5	до 0,1
Температура поверхні, град	до 100	до 1500
Зміна твердості	до 2	до 2
Швидкість руйнування, мкм/год	10...15	1...5

*Фретінг процес* – це руйнування поверхонь деталей, що проявляється у різко вираженому динамічному окисненні чи схоплюванні. Він виникає при терті ковзання із зворотно-поступальними рухами і динамічним прикладанням навантажень, що викликає на поверхнях тертя локалізацію значних напружень та температур на обмежених ділянках. Швидкість процесу динамічного окислення 1...5 мкм/год, а схоплювання – 5...10 мкм/год.

*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  $\Delta$  збільшується, підкоряючись залежності  $\Delta = \Delta_0 + kU$ .

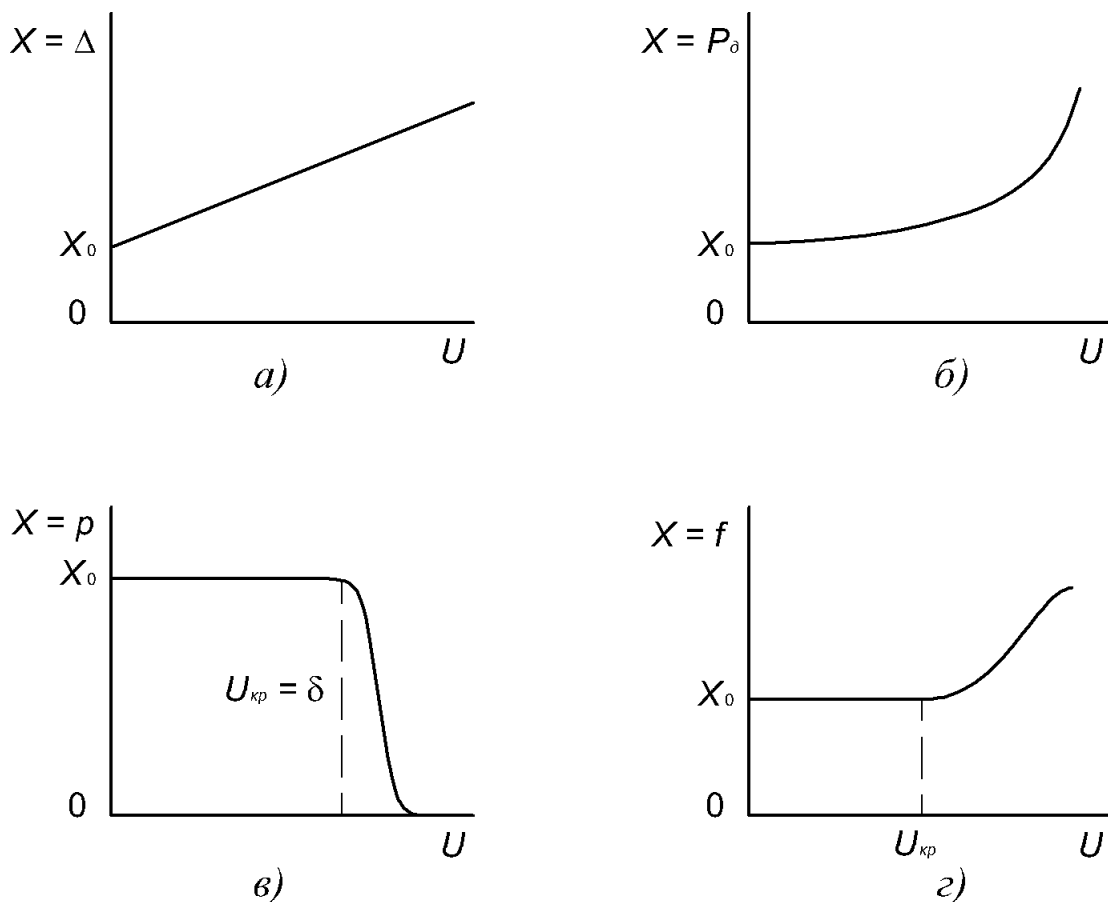


Рисунок 5.1 – Схема типових залежностей між  $U$  та  $X$ :

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  $i$  може бути одержана в результаті розв'язку відповідних диференціальних 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 настає 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  $0 \leq t \leq T$  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  $X \leq X_{\max}$ , 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.



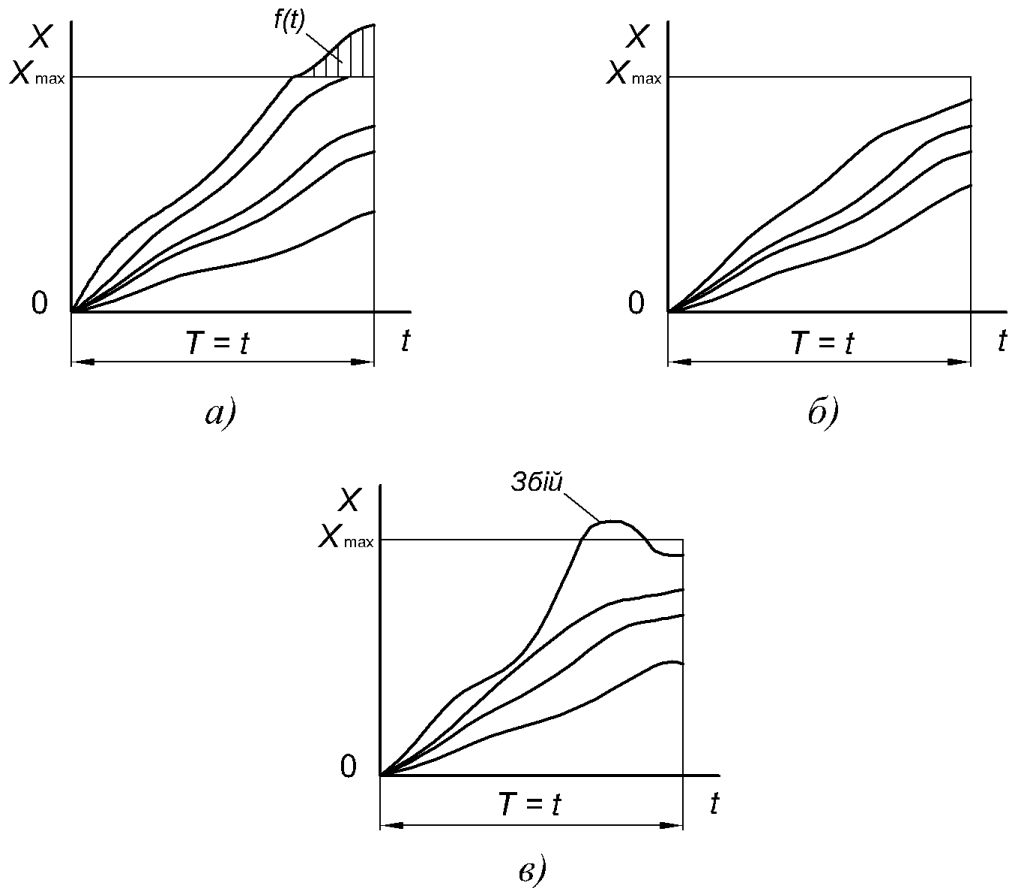


Рисунок 5.2 – Ступінь віддаленості реалізацій  $X(t)$  від граничного стану:  
 а – звичайні вироби; б – високонадійні вироби; в – вироби, в роботі яких  
 можливі збої

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, невідповідної 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 визначаючи 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.

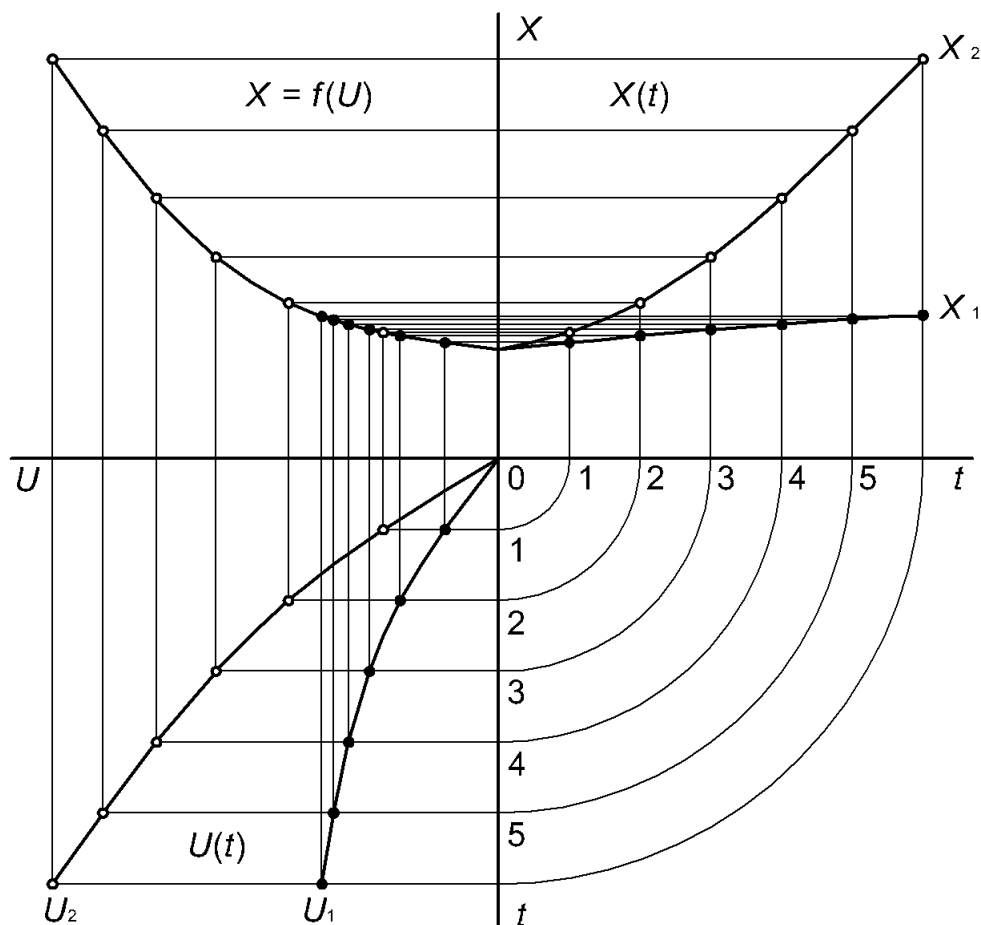


Рисунок 5.3 – Схема формування закону зміни вихідного параметру  $X(t)$  виробу

#### 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):

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

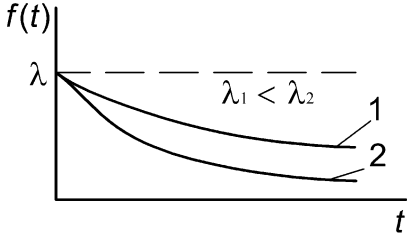
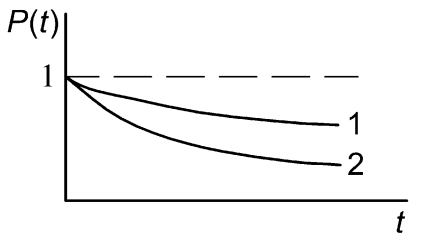
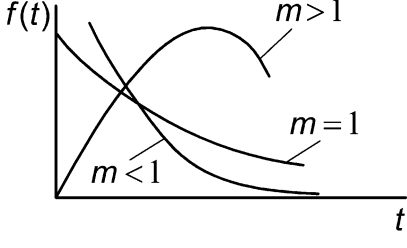
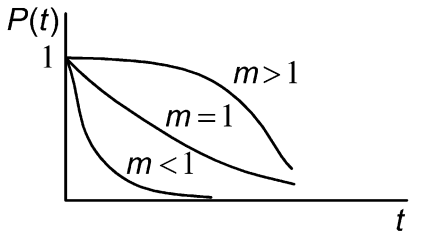
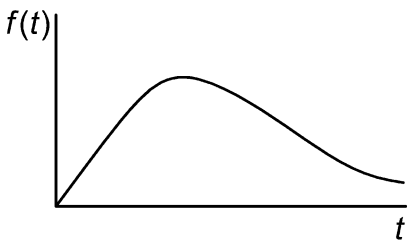
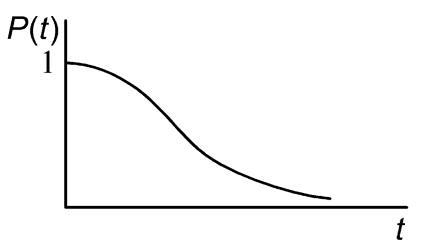
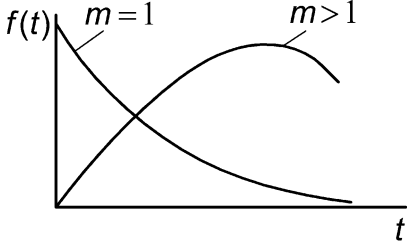
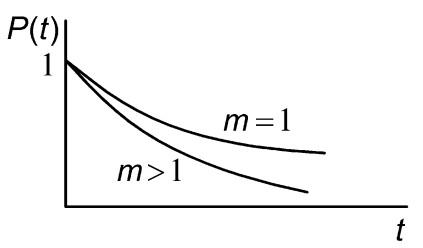
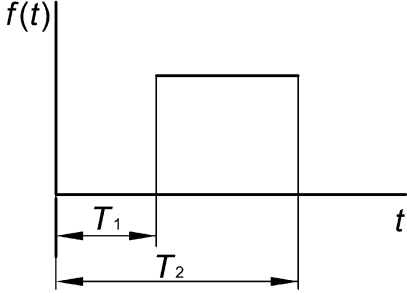
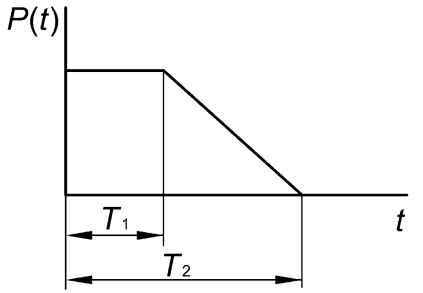
дисперсію  $D$ , або середнє квадратичне відхилення  $\sigma = \sqrt{D}$ ,

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

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

<p>Експоненціальний</p> $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ $P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T}}$		
<p>Вейбула</p> $f(t) = \frac{mt^{m-1}}{T_1} e^{-\frac{t^m}{T_1}}$ $P(t) = e^{-\frac{t^m}{T_1}},$ <p>де <math>m</math> – параметр форми</p>		
<p>Релея</p> $f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$ $P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$		
<p>Гамма-розподіл</p> $f(t) = \frac{t^{m-1}}{T_1^m \tilde{\Gamma}(m)} e^{-\frac{t}{T_1}}$ $P(t) = \int_0^t f(t) dt$		
<p>Рівномірний розподіл при <math>T_1 \leq t \leq T_2</math>:</p> $f(t) = \frac{1}{T_2 - T_1}$ $P(t) = \frac{T_2 - t}{T_2 - T_1}$		

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  $\gamma$ :

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

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

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

Математичне сподівання

$$X_{\bar{n}\delta} = a_0 + \gamma_{\bar{n}\delta} T.$$

Середнє квадратичне відхилення

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

де  $a_0$  – математичне сподівання;  $\sigma_a$  – середнє квадратичне відхилення параметра  $a$ .

Ймовірність безвідмовної роботи:

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

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

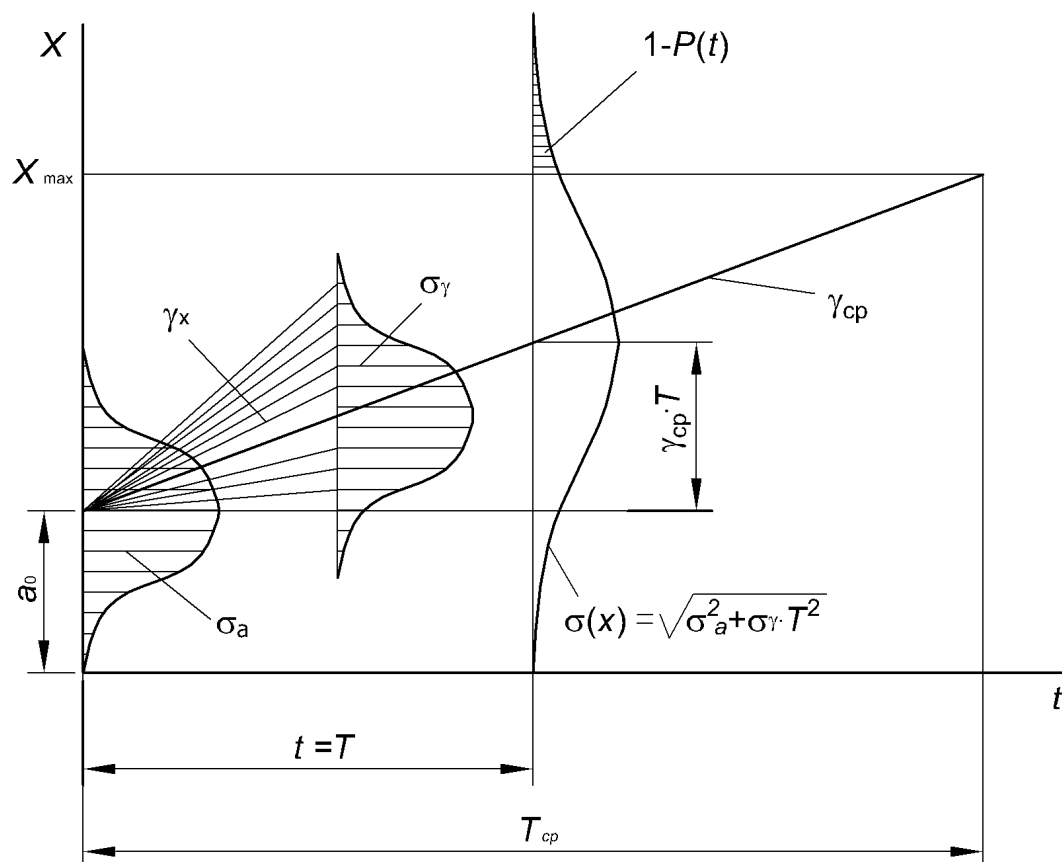


Рисунок 5.4 – Схема формування поступової відмови при розсіюванні початкових параметрів виробу

## 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*  $\lambda$  – ймовірністю виникнення відмови в одиницю часу при умові, що до цього моменту відмова не виникла.

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

Приймаючи  $\lambda = \text{const}$ , 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

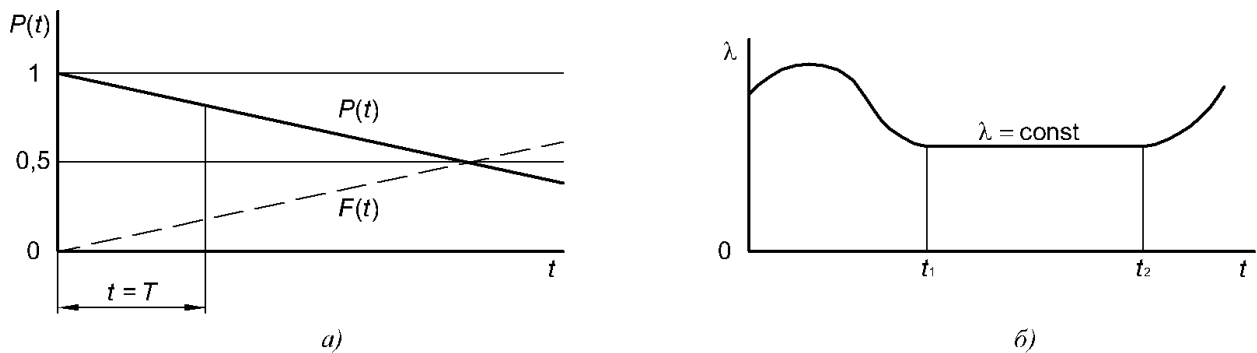


Рисунок 5.5 – Експоненціальний закон при раптових відмовах:

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  $U_{\max}$ .



1. Вихідний параметр визначається, в основному, одним видом пошкодження

$$X_{\max} = kU_{\max}$$

2. Вихідний параметр визначається сумарним пошкодженням елементів з урахуванням їх впливу через певне передаточне відношення  $k_i$

$$X_{\max} = \sum_1^n k_i U_{i \max}$$

3. Вихідний параметр зв'язаний з граничним пошкодженням елементів складною функціональною залежністю

$$X_{\max} = \varphi(U_1; U_2; \dots U_n).$$

Отже, граничний стан за ступенем пошкодження ( $U_{\max}$ ) повинен призначатися, виходячи з допустимих відхилень вихідного параметра  $X_{\max}$  з урахуванням залежності між  $X_{\max}$  і  $U_{\max}$ .

## **6.2. Критерії оцінки граничного стану за вихідним параметром**

Основним критерієм граничного стану виробу є те екстремальне значення параметра, що допускається технічними умовами на виріб. Однак сам хід процесу зміни вихідних параметрів і наявність зон їх стрімкого зростання також служить критерієм для встановлення максимально допустимих значень  $X_{\max}$ .

Можливі три основних групи критеріїв:

1. В результаті зносу або інших пошкоджень відбувається стрибкоподібна зміна стану виробу і він перестає функціонувати (див. рис. 6.1). Наприклад, втрата герметичності резервуара при корозії, заклинювання механізму при його зносі, поломка деталі через крихке руйнування. В цьому випадку за вихідним параметром важко оцінювати близькість виробу до граничного стану і більш доцільно регламентувати максимально допустиме пошкодження  $U_{\max}$ .

2. У результаті процесу пошкодження має місце зона інтенсивного зростання вихідних параметрів виробу – ріст вібрацій, температури, шуму. Для цієї групи необхідно встановлювати значення  $X_{\max}$ , що відповідає початку інтенсифікації процесу втрати працездатності.

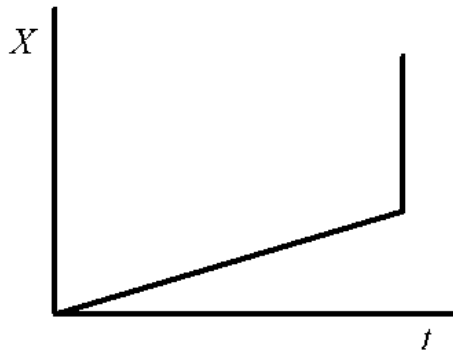


Рисунок 6.1 – Стрибкоподібна зміна вихідного параметра виробу

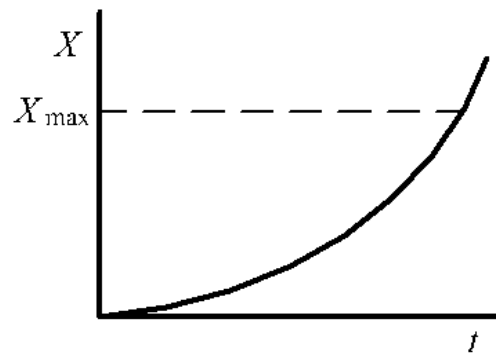


Рисунок 6.2 – Зміна вихідного параметра виробу зі зростаючою інтенсивністю

3. Основний випадок призначення  $X_{\max}$  – коли процес пошкодження не має екстремальних зон і вихідні параметри визначаються встановленими на виріб технічними умовами.

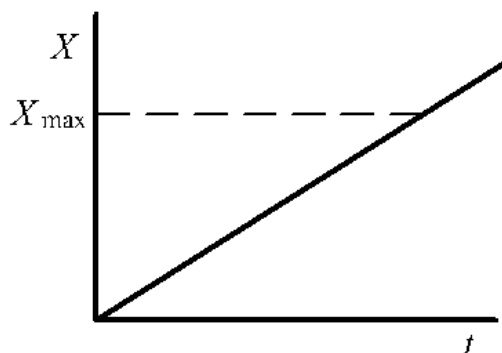


Рисунок 6.3 – Зміна вихідного параметра виробу без екстремальних зон

### 6.3. Регламентація граничних станів в нормативно-технічній документації

Прагнення до створення якісних виробів призводить до підвищених вимог до його вихідних параметрів і росту їх кількості. При встановленні номенклатури регламентованих параметрів повинні враховуватись наступні фактори.

*Ефективність роботи машини*, що визначається її призначенням. Експлуатаційні показники визначають рівень розвитку машини і складають основний зміст ТУ на неї, у яких повинні бути вказані граничні значення вихідних параметрів.

*Небезпека подальшої експлуатації машини* може обмежити значення окремих параметрів, хоч ефективність її роботи при цьому може бути достатньо високою (робоча температура і тиск мастила, його забруднення).

*Шкідливий вплив на навколишнє середовище* хоча безпосередньо і не пов'язаний з ефективністю роботи та небезпекою подальшої експлуатації машини має вагоме значення. У відповідних нормативних документах встановлюються обмеження на шум машини, склад викидів, рівень радіації, вібрації та ін.

Подібна картина буде мати місце при оцінюванні впливу роботи окремих елементів та механізмів машини на інші її елементи. Тепловиділення, вібрації, деформації та інші зміни в працюючому вузлі можуть не впливати на його функціонування, але чинити суттєвий вплив на працездатність інших вузлів та машини в цілому.

*Трудомісткість відновлення.* Зміна вихідного параметра в допустимих межах може інколи призвести до такого пошкодження виробу, при якому відновлення втраченої працездатності буде пов'язане зі значною трудомісткістю.

При призначенні ТУ на граничні стани вихідних параметрів виробу вибираються лише ті, зміни яких можливі в процесі експлуатації. Якщо ж в процесі експлуатації даний вихідний параметр не змінюється, то в ТУ не встановлюються його граничні значення.

#### **6.4. Максимально допустиме значення вихідного параметра, як випадкова величина**

У випадку, коли встановлюються конкретні вимоги до виробу, гранично допустиме значення параметра є детермінованою величиною.

Однак в окремих випадках  $X_{\max}$  може бути і випадковою величиною, яка має дисперсію. Це можливо у тому випадку, коли оцінюється вимога споживача до виробу і його параметрів. Наприклад, оцінюючи точність металорізального верстата даної моделі, можна враховувати його можливу роботу в різних умовах з різними вимогами до точності виробів, що на ньому обробляються.

В цьому випадку допустиме значення вихідного параметра буде характеризуватися математичним сподіванням і дисперсією, а схема виникнення відмови буде визначатися ймовірністю перетину двох зон: зони можливого існування параметра (зона стану) і зони працездатності.

### 6.5. Максимальні і допустимі значення параметрів з урахуванням системи ремонту

Для деталей і виробів, що ремонтуються при періодичних планових ремонтах, допустимі значення параметрів  $X_{\text{доп}} \leq X_{\text{max}}$ .

Якщо протяжність міжремонтного періоду  $T_0$ , то за цей час параметр виробу зміниться на величину  $\gamma_x T_0$ , де  $\gamma_x$  – швидкість процесу зміни параметра.

Допустиме значення параметра  $X_{\text{доп}}$ , починаючи з якого при періодичних ремонтах виріб необхідно ремонтувати, буде рівним

$$X_{\text{доп}} = X_{\text{max}} - \gamma_x T_0.$$

Враховуючи, що

$$\gamma_x = \frac{X_{\text{доп}}}{T},$$

де  $T$  – час роботи виробу до ремонту, одержимо

$$X_{\text{доп}} = X_{\text{max}} - \frac{X_{\text{доп}} T_0}{T},$$

звідки

$$X_{\text{доп}} = \frac{X_{\text{max}}}{1 + \frac{T_0}{T}}$$

Якщо  $K$  – ний періодичний ремонт, то час роботи виробу буде  $T = K \cdot T_0$ , то

$$X_{\text{доп}} = X_{\text{max}} \frac{K}{K + 1}$$

Формула вірна при  $\gamma_x = \text{const}$ , тобто при зміні вихідного параметра з постійною швидкістю від нуля до певного граничного значення.

Наприклад відомо, що точність обробки на верстаті повинна знаходитись в межах  $\pm 0,05$  мм, тобто  $X_{\text{max}} = 0,1$  мм – допустима похибка. Чи потрібно

відновлювати точність верстата, якщо перед третім плановим ремонтом фактична похибка складає  $X_\phi = 0,08$  мм. Розрахуємо  $X_{\text{доп}}$ .

$$X_{\text{доп}} = 0,1 \cdot \frac{3}{3+1} = 0,075 \text{ мм} \leq X_\phi.$$

Хоча параметр  $X_\phi < X_{\text{max}}$ , але він вийде за допустимі межі на протязі міжремонтного періоду, оскільки  $X_\phi < X_{\text{доп}}$ , що недопустимо, отже верстат потребує відновлення точності.

## ТЕМА 7. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ МАШИН

### 7.1. Безвідмовність об'єктів, що не ремонтуються

Безвідмовність неремонтованих об'єктів оцінюється такими показниками надійності: ймовірністю безвідмовної роботи, інтенсивністю відмов, середнім напрацюванням до відмови, гамма-процентним напрацюванням до відмови.

Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  – це ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникає.

Нехай  $t$  – час, протягом якого треба визначити ймовірність безвідмовної роботи (напрацювання),  $T_1$  – час роботи об'єкта до першої відмови. Тоді згідно з означенням імовірності безвідмовної роботи є справедливим вираз:

$$P(t) = P(T_1 \geq t).$$

Ймовірність безвідмовної роботи звичайно визначають для невідновлюваних об'єктів за умови, що на початку заданого напрацювання об'єкт працездатний. У протилежному випадку може розглядатися ймовірність невникнення додаткової (наступної) відмови.

Конкретне значення ймовірності безвідмовної роботи має певний зміст лише тоді, коли воно поставлене у відповідність із заданим неперервним або сумарним напрацюванням, протягом якого можливе виникнення відмови. Іншими словами, про безвідмовність об'єкта не можна судити лише за значенням імовірності безвідмовної роботи, коли невідомо, якому значенню заданого напрацювання відповідає ця ймовірність.

Показник імовірності безвідмовної роботи, як і будь-яка ймовірність, має такі властивості:  $P(t)$  – спадна функція часу; як будь-яка ймовірність випадкової величини  $0 \leq P(t) \leq 1$ ; має межу  $P(0) = 1$ ,  $P(\infty) = 0$ .

Наприклад, якщо ймовірність безвідмовної роботи протягом  $t = 500$  год дорівнює  $0,95$  ( $P(500) = 0,95$ ), то це означає, що при достатньо великому парку машин даної моделі в середньому майже  $5\%$  машин втратять свою працездатність раніше, ніж через  $500$  год роботи.

Показник  $P(t)$  може бути застосований і для оцінки безвідмовності одного виробу. В цьому разі  $P(t)$  визначає шанси виробу пропрацювати без відмов протягом заданого періоду часу.

Про працездатність об'єкта можна говорити лише в імовірнісному розумінні. Навіть за достатньо малого значення часу функціонування об'єкта, тобто при  $t \ll T$ ,  $P(t) \neq 1$ , оскільки й у цьому разі можлива поява раптових відмов.

На практиці для визначення  $P(t)$  за статистичними даними про відмови об'єктів звичайно використовують методи безпосереднього підрахунку ймовірностей.

Для оцінки ймовірності будь-якої події  $P(A)$  в теорії ймовірностей введено поняття частот події (статистичної ймовірності)  $P^*(A)$ :

$$P^*(A) = \frac{m}{N},$$

де  $m$  – кількість появи подій при визначеній кількості проведених дослідів;

$N$  – загальна кількість проведених дослідів (кількість досліджуваних об'єктів).

$$P^*(A) = \frac{N(0) - r(t)}{N(0)} = \frac{N(t)}{N(0)},$$

де  $N(0)$  – кількість досліджуваних об'єктів (кількість працездатних об'єктів у початковий момент часу);

$r(t)$  – кількість об'єктів, що відмовили за час  $t$ ;

$N(0) - r(t) = N(t)$  – кількість об'єктів, що не відмовили (працездатних об'єктів) на момент часу  $t$ .

Ймовірність безвідмовної роботи об'єкта в інтервалі часу від  $t$  до  $t_1$

$$P^*(t, t+t_1) = \frac{N(t+t_1)}{N(t)}$$

де  $N(t+t_1)$  – кількість працездатних об'єктів на момент часу  $t+t_1$ ;

Отже, ймовірність безвідмовної роботи в найпростішому випадку статистично визначається відношенням кількості об'єктів, що безвідмовно пропрацювали до моменту часу  $t$ , до кількості об'єктів, працездатних на початковий момент часу  $t=0$ .

При збільшенні кількості досліджуваних об'єктів,  $P^*(t) \rightarrow P(t)$ .

На практиці іноді зручнішою характеристикою є ймовірність відмов  $Q(t)$ :

$$Q(t, t+t_1) = \frac{r(t+t_1)}{N(t)}.$$

Тобто ймовірність відмови  $Q(t)$  дорівнює відношенню кількості об'єктів, що відмовили за час  $t$ , до загальної кількості досліджуваних об'єктів  $N$ .

Можна записати

$$Q(t) = 1 - P(T_1 \geq t) = P(T_1 \leq t).$$

Тобто ймовірність відмови – це ймовірність того, що час роботи об'єкта до першої відмови дорівнює або менше часу, протягом якого визначається ймовірність виникнення відмови.

З теорії ймовірностей відомо, що

$$P(X < x) = F(x)$$

або

$$P(T_1 < t) = F(t).$$

Тоді

$$Q(t) = F(t).$$

де  $F(x)$ ,  $F(t)$  – деякі інтегральні функції розподілу випадкової величини.

Похідною від інтегральної функції розподілу є диференціальний закон (щільність) розподілу  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t),$$

Тоді можна записати

$$Q'(t) = f(t).$$

Тобто *похідною від імовірності відмови є диференціальний закон розподілу часу роботи  $T_1$  об'єкта до його відмови.*

Із викладеного вище випливає

$$P(t) = 1 - F(t).$$

З теорії ймовірностей відомо, що

$$P(T) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt.$$

*Імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  є безумовною ймовірністю того, що в інтервалі часу від 0 до  $t$  не настала відмова, тобто це – ймовірність того, що відмова настане в інтервалі від  $t$  до  $\infty$ , оскільки в граничному значенні  $P(\infty) = 0$ .*

З формули видно, що кількісно оцінити  $P(t)$  параметричним способом можна лише при відомому або встановленому законі розподілу відмов у часі, бо щільність розподілу  $f(t)$  (диференціальної функції розподілу, або, як її ще називають, щільністю ймовірності) залежно від закону розподілу випадкової величини має різне значення.

*Середнє напрацювання до відмови  $T_{cp}$  – це математичне сподівання напрацювання об'єкту до першої відмови.*

За ймовірнісним підходом (як і в разі будь-якого математичного сподівання випадкової величини) – математичне сподівання середнього напрацювання до відмови визначається залежністю

$$T_{cp} = M[T_1] = \int_0^{\infty} tf(t)dt,$$

або

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} tQ'(t)dt$$

або

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} tF'(t)dt,$$



де  $T_1$  – випадкове напрацювання об'єкта до першої відмови.

Наближено:

$$T_{cp} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i,$$

де  $T_i$  – час напрацювання до відмови  $i$ -го виробу

$n$  – кількість випробуваних виробів.

Виконавши певні математичні операції, можна встановити залежність між  $T_{cp}$  і  $P(t)$ ,  $T_{cp}$  і  $\lambda(t)$ :

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

*тобто середній час напрацювання до відмови є площею під кривою ймовірності безвідмовної роботи.*

Гранична інтенсивність відмов дорівнює оберненій величині напрацювання до відмови:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \frac{1}{T_{cp}},$$

*тобто границя, до якої прямує інтенсивність відмов при  $t \rightarrow \infty$ , дорівнює величині, оберненій середньому часові напрацювання до відмови (безвідмовної роботи).*

Проте  $\lambda(t) = \lambda$ , тоді

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}.$$

Оскільки середній час напрацювання до відмови є оцінкою надійності неремонтованих об'єктів, можна очікувати появи експоненціального закону розподілу

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

або

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}.$$

При  $T_{cp} = t$  матимемо

$$P(t) = e^{-1} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,7183} = 0,37,$$

тобто в разі експоненціального закону розподілу (експоненціального закону надійності) середній час безвідмовної роботи  $T_{cp}$  – це час, протягом якого ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  зменшується в  $e = 2,7183$  разів.

Однією з позитивних якостей середнього часу напрацювання до відмови як характеристики надійності є простота його обчислення за експериментальними даними про відмови об'єкта.

Однак цій характеристиці надійності властиві й істотні недоліки:

- величина  $T_{cp}$  не дає змоги оцінити надійність об'єкта, час роботи якого набагато менший за середній час напрацювання до відмови;
- середній час напрацювання до відмови характеризує надійність об'єкта до першої відмови, тобто є оцінкою надійності об'єктів лише одноразового використання неремонтованих об'єктів;
- середній час між відмовами як будь-яке середнє значення випадкової величини не може повністю характеризувати час безвідмовної роботи об'єкта.

На перший погляд, якщо середнє напрацювання до відмови машини становить, наприклад, 100 год і заданий (потрібний) час безвідмовної роботи – також 100 год, то й імовірність безвідмовної роботи дорівнює одиниці, або 100 %. Проте за законами теорії ймовірностей це зовсім не так. Наприклад, відомо, що 10 однотипних виробів пропрацювали безвідмовно відповідно 80, 120, 90, 140, 70, 95, 75, 130, 85, 115 год. Тоді

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n t_i;$$

$$T_{cp} = \frac{80 + 120 + 90 + 140 + 70 + 95 + 75 + 130 + 85 + 115}{10} = 100 \text{ год.}$$

Але, як видно з прикладу, при  $T_{cp} = 100$  год 6 виробів з 10 пропрацювали без відмов менше 100 год, тобто менше заданого часу. Тому, ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \frac{N - r(t)}{N} = \frac{10 - 6}{10} = 0,4.$$

Тобто, лише 40 виробів зі 100 пропрацювали без відмови.

Отже, якщо ймовірність безвідмовної роботи об'єкта є величиною заданою, то для її забезпечення треба або збільшити середнє напрацювання до відмови, або зменшити потрібний час його неперервної безвідмовної роботи.

Як показують розрахунки, щоб забезпечити заданий час роботи з імовірністю  $P(t) = 0,9$ , середнє напрацювання до відмови має перевищувати заданий час безвідмовної роботи в 10 разів, з  $P(t) = 0,99$  – у 100 разів і з  $P(t) = 0,999$  – у 1000 разів.

*Гамма-процентне напрацювання до відмови* – це напрацювання, протягом якого відмова об'єкта не виникає з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

Гамма-процентне напрацювання до відмови  $T_\gamma$  визначають графічно (див. рис. 7.1) за розподілом функції  $P(T_\gamma)$  з умови:

*імовірнісним методом*

$$1 - F(T_\gamma) = 1 - \int_0^{T_\gamma} f(t) dt;$$

*статистичним методом*

$$1 - F(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100};$$

або

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}.$$

На рисунку 7.1 представлено графоаналітичний метод визначення гамма-процентного напрацювання до відмови.

Як видно з формул, гамма-відсоткове напрацювання до відмови дорівнює квантилю відповідного розподілу. Якщо ймовірності, що відповідають цим квантилям, виражають у відсотках, то для показників безвідмовності зазвичай задають значення 90; 95; 99; 99,5 % і т.д. Тоді ймовірність виникнення відмови на відрізку  $[0; t]$  становитиме 0,10; 0,05; 0,01; 0,05 і т.д.

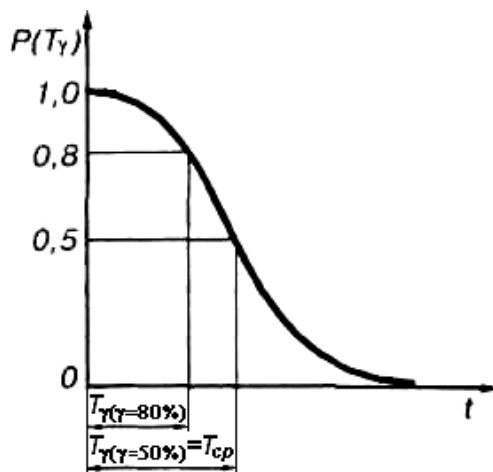


Рисунок 7.1 – Графоаналітичний метод визначення гамма-процентного напрацювання до відмови

## 7.2. Безвідмовність об'єктів, що ремонтуються

Безвідмовність ремонтних об'єктів оцінюється трьома показниками: параметром потоку відмов, середнім параметром потоку відмов і напрацюванням на відмову.

Експлуатацію багатьох об'єктів можна описати у такий спосіб. У початковий момент часу виріб починає роботу і працює до відмови. Після відмови відбувається відновлення об'єкта і він знову працює до відмови і т.д. Моменти відмов, без урахування часу відновлення, на осі часу утворюють потік відмов. Такий потік відмов оцінюється параметром потоку відмов (подій).

Параметр потоку відмов (подій) – відношення математичного сподівання кількості відмов відновлюваного об'єкта за досить мале його напрацювання до значення цього напрацювання.

Параметр потоку будь-яких подій є границею

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q'(t, t + \Delta t) + Q''(t, t + \Delta t)}{\Delta t},$$

де  $Q'(t, t + \Delta t)$  – імовірність появи однієї події (відмови) за проміжок часу від  $t$  до  $t + \Delta t$ ;

$Q''(t, t + \Delta t)$  – імовірність появи двох чи більше подій за той самий проміжок часу, а точніше, за один і той самий момент часу.

За характером появи потоки подій (відмов) поділяються на ординарні, стаціонарні, з обмеженими наслідками, без наслідків і найпростіші.

*Потік випадкових подій називається ординарним, якщо ймовірність появи двох чи більше подій за один і той самий момент часу настільки мала, що це можна вважати майже неможливим, тобто*

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q''(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = 0.$$

У разі композиції двох або більше ординарних потоків параметри їх складаються і потік залишається ординарним.

*Потік випадкових подій називається стаціонарним, якщо його ймовірнісний режим не змінюється в часі.*

Композиція стаціонарних потоків утворює стаціонарний потік. У період припрацювання потік відмов нестаціонарний, а після закінчення припрацювання стає стаціонарним.

*Потік подій з обмеженими наслідками – це такий потік, коли випадкові проміжки часу між послідовними (сусідніми) подіями взаємозалежні.*

*Потік подій без наслідків має місце, коли після будь-якого моменту часу перебіг подій не залежить від того, як вони відбувалися до цього моменту.*

*Найпростіший потік подій – це потік, що є одночасно ординарним, стаціонарним і без наслідків.*

У разі композиції кількох найпростіших потоків сумарний потік також є найпростішим.

Потоки відмов окремих елементів, що є у виробі багаторазової дії, – ординарні з обмеженими наслідками.

Якщо виріб багаторазової дії складається з достатньо великої кількості незалежних елементів, що мають малі інтенсивності відмов, то незалежно від законів розподілу тривалості служби цих елементів сумарний потік відмов після припрацювання наблизатиметься до найпростішого.

Як характеристику потоку відмов використовують ведучу функцію  $\Omega(t)$  даного потоку, що дорівнює математичному сподіванню числа відмов за час  $t$ :

$$\Omega(t) = M[r(t)],$$

де  $r(t)$  – кількість відмов за час  $t$ .

Математичне сподівання кількості відмов за інтервал часу  $(t, t+\Delta t)$  визначають за формулою

$$M[r(t, t + \Delta t)] = \Omega(t + \Delta t) - \Omega(t),$$

але

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} = \Omega'(t).$$

Позначимо  $\Omega'(t) = \omega(t)$ . Функція  $\omega(t)$ , похідна від ведучої функції  $\Omega(t)$ , називається *параметром потоку відмов*.

Параметр потоку відмов характеризує середню кількість відмов, що чекають у малому інтервалі часу, і пов'язаний ведучою функцією  $\Omega(t)$  співвідношенням

$$\Omega'(t) = \int_0^t \omega(t) dt.$$

У разі непараметричного методу оцінки, параметр потоку відмов визначають за формулою

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r r_{ij}(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r r_{ij}}{N(0)\Delta t}$$

Залежності інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  і параметра потоку відмов  $\omega(t)$  можна зобразити у вигляді кривої (рис. 7.2). Криву 1 часто називають  $\lambda$ -характеристикою, або типовою  $\lambda$ -характеристикою.

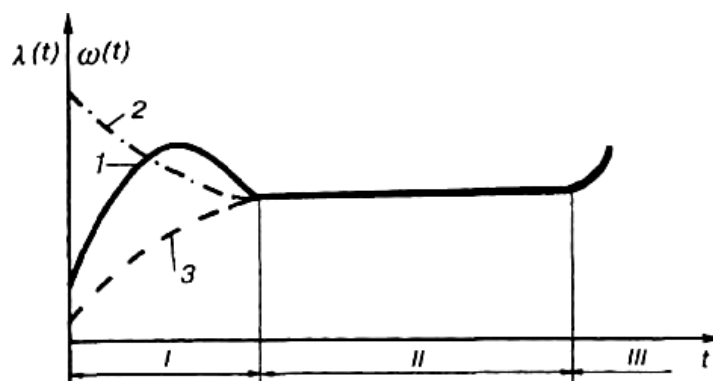


Рисунок 7.2 – Графічна інтерпретація інтенсивності  $\lambda(t)$  та параметра потоку  $\omega(t)$  відмов

Однак назвати її типовою можна лише умовно, бо дедалі частіше в спеціальній літературі розглядають криву, позначену цифрою 3, а для неремонтованих об'єктів – цифрою 2. Проте в тому й іншому разі ця крива характеризується трьома зонами: *I* – зоною припрацювання (в електроніці – зона випалювання); *II* – зоною усталеної роботи і *III* – зоною граничного стану.

*Зона припрацювання* (зона *I*) характеризується порівняно високою інтенсивністю відмов за рахунок великої кількості раптових відмов, здебільшого технологічного характеру. Очевидно, що ця ділянка кривої для кожного типу машин матиме особливий характер залежно від технології виробництва (ремонту) та засобів контролю якості.

Дослідження показали, що для механічних систем у зоні *I* інтенсивність  $\lambda(t)$  та параметр потоку  $\omega(t)$  відмов нових машин характеризуються ділянкою кривої 3, а машини після капітального ремонту та частина нових машин у зоні *I* інтенсивність  $\lambda(t)$  та параметр потоку  $\omega(t)$  відмов характеризуються ділянкою кривої 1 з характерним «сплеском». Очевидно, чим досконалішими є конструкція машин, а також технології виготовлення та ремонту (за наявності поопераційного контролю якості), тим меншим буде «сплеск» або він зникне зовсім. Тоді  $\lambda(t)$  та  $\omega(t)$  характеризуватимуться ділянкою кривої 3.

Надалі перед спеціалістами в галузі надійності постає завдання не лише кількісно оцінити зону припрацювання, а й домогтися того, щоб раптові відмови, які виникають у цей період, виявлялися під час обкатування на заводі.

Після зміни елементів, які відмовили у початковий (перший) період експлуатації машини, інтенсивність відмов поступово скорочується і настає другий (основний і найтриваліший) період – період стійкої роботи, який характеризується майже *стабільною інтенсивністю відмов* (зона *II*). Цей період характеризується переважно появою раптових відмов, які підпорядковуються експоненціальному закону розподілу, накопиченням умов зміни параметрів, які зумовлюють поступові відмови. Тут інтенсивність відмов та інтенсивність потоку відмов є сталими величинами:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const};$$

$$\omega(t) = \lambda = \text{const};$$

де  $\lambda$  – параметр експоненціального закону розподілу.

*Зона III* характеризується різким зростанням інтенсивності відмов за рахунок накопичення умов, що спричиняють появу поступових відмов. При цьому виникає якісний стрибок у стані об'єкта, тобто на швидкість спрацювання починають впливати нові фактори, які раніше не відчувалися, що призводить до погіршення стану об'єкта і, нарешті, до його руйнування – відмови.

*Середній параметр потоку відмов* – це відношення математичного сподівання числа відмов відновлюваного об'єкта за кінцеве напрацювання до значення цього напрацювання.

Порівняно з параметром потоку відмов цей показник відображає кількість відмов за скінченний відрізок часу  $[t_1; t_2]$ , причому  $t_1 \leq t \leq t_2$ .

Виходячи з означення, можна записати

$$\omega(t) = \frac{M[r(t_2) - r(t_1)]}{t_2 - t_1}.$$

Статистичну оцінку параметра потоку відмов для парку машин визначають за формулою

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N r(t_2) - \sum_{i=1}^N r(t_1)}{t_2 - t_1}$$

*Середнє напрацювання на відмову (середнє напрацювання між відмовами)* – це відношення напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного сподівання кількості його відмов протягом цього напрацювання.

Згідно з означенням,

$$T_{\text{від}} = \frac{\Delta t}{M[r(t, t + \Delta t)]},$$

де  $T_{\text{від}}$  – середнє напрацювання на відмову, що визначається для інтервалу  $(t, t + \Delta t)$ .

*Отже, напрацювання на відмову означає напрацювання відновлюваного об'єкта, що припадає в середньому на одну його відмову, в інтервалі часу сумарного напрацювання об'єкта.*



Для нестационарного потоку відмов середнє напрацювання на відмову залежить від тривалості інтервалу напрацювання, що розглядається, та від його розміщення на осі сумарного напрацювання об'єкта.

Середнє напрацювання на відмову статистично визначається відношенням сумарного напрацювання відновлюваних об'єктів до сумарної кількості відмов цих об'єктів за час спостереження.

За експоненціальним законом розподілу, якщо відоме середнє значення потоку відмов,

$$\bar{T}_{\text{від}} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{\lambda}.$$

Напрацювання на відмову  $\bar{T}_{\text{від}}$  є одним із основних показників безвідмовності, однак, за аналогією з напрацюванням до відмови, в деяких випадках можна застосовувати такий показник безвідмовності об'єкта, як *середня тривалість безвідмовного зберігання*. Цей показник відрізняється від напрацювання до відмови тим, що замість сумарного напрацювання розглядається неперервний час зберігання.

На осі часу моменти відмов (коли час відновлення не враховується) утворюють потік відмов, а моменти відновлень – потік відновлень.

Повний і точний опис експлуатації об'єктів за цією схемою побудовано на підставі теорії відновлення.

### **7.3. Довговічність машин і механізмів**

Знання характеристик довговічності машин та їхніх складових одиниць дає змогу обґрунтовувати заходи з ТО та розрахувати економічно доцільні технічні умови на поточний та капітальний ремонт. Розрахунок потреби в запасних частинах з урахуванням їхньої надійності також активно впливає на експлуатаційні характеристики машин.

ДСТУ 2860–94 передбачає такі показники довговічності: призначений ресурс, призначений термін служби, середній ресурс, середній термін служби, гамма-процентний ресурс, гамма-процентний термін служби.

*Призначений ресурс* – це сумарне напрацювання об'єкта, в разі досягнення якого експлуатація об'єкта має бути припинена незалежно від його стану (ДСТУ не передбачається).

У загальному випадку ресурс – це сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Призначений ресурс встановлюють зазвичай для об'єктів, перехід яких у граничний стан особливо небажаний або майже недопустимий у зв'язку з можливими серйозними наслідками такого переходу. Отже, встановлення призначеного ресурсу має на меті забезпечити примусове завчасне припинення застосування об'єкта за призначенням до того, як відбудеться його перехід у граничний стан.

При досягненні сумарного напрацювання, що дорівнює призначеному ресурсові, об'єкт підлягає поточному чи капітальному ремонту, списанню з обліку або передається для використання не за призначенням (наприклад, як навчальний макет).

Отже, для об'єктів, які можна ремонтувати, розрізняють доремонтний, міжремонтний, післяремонтний та повний призначений ресурс.

Призначений ресурс об'єктів, які не можна ремонтувати, різновидів не має і дорівнює напрацюванню до відмови.

При визначенні призначеного ресурсу виходять з безпеки застосування (функціонування) об'єкта або з економічних міркувань.

*Призначений ресурс можна визначити за допомогою пасивного експерименту (за даними статистики). Для цього слід побудувати щільність розподілу ресурсу  $f(t)$  і знайти параметри закону розподілу.*

*Призначений термін служби* – це календарна тривалість експлуатації, при досягненні якої експлуатація об'єкта має бути припинена незалежно від його технічного стану. В загальному випадку термін служби – це календарна тривалість експлуатації від початку експлуатації об'єкта або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Призначений термін служби

встановлюють для об'єктів, показники надійності яких пов'язані з життєзабезпеченням людей або появою важких наслідків.

Згідно з ГОСТ 27.002 – 89 призначений ресурс і призначений термін служби не належить до показників надійності (довговічності), а є техніко-експлуатаційними характеристиками. Принципового значення це не має, бо чіткої межі між показниками надійності та техніко-експлуатаційними характеристиками встановити не можна. Тим більше, що в цьому разі беруть до уваги прогнозовані (або досягнуті) значення показників надійності.

*Середній ресурс* – це математичне сподівання ресурсу.

Показників надійності, що характеризують середній ресурс, кілька: середній ресурс до певного ремонту, середній ресурс між ремонтами та середній ресурс до списання. І кожний з них визначається параметричним способом як будь-яке математичне сподівання з формули

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

або

$$T_{p.cp} = \int_0^{\infty} t F'(t) dt,$$

де  $f(t)$  – щільність розподілу напрацювання до відмови;

$F'(t)$  – інтегральна функція розподілу напрацювання до відмови.

Знаючи (або встановивши) закон розподілу ресурсу і підставляючи значення  $f(t)$  або  $F'(t)$  у першу чи другу формулу, знайдемо  $T_{cp}$ , що відповідає цьому закону.

У разі розрахунків на практиці статистичним методом можна користуватися наближеною формулою

$$T_{p.cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{pi},$$

де  $N$  – кількість працездатних об'єктів, що збігається із середнім напрацюванням до відмови.

Однак середній ресурс, як будь-яка середня величина, не може характеризувати час роботи об'єкта. Тому треба знати ще дисперсію, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації  $V$ .

Дисперсію ресурсу при  $N < 25$  можна визначити за формулою

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{pi} - T_{p.cp})^2}{N - 1},$$

де  $T_{pi}$  – ресурс  $i$  - ї машини.

З теорії ймовірностей відомо, що середнє квадратичне відхилення є коренем квадратним з дисперсії:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{pi} - T_{p.cp})^2}{N - 1}}.$$

При  $N > 25$  у формулах знаменник беруть такий, що дорівнює  $N$  (замість  $N - 1$ ).

Коефіцієнт варіації

$$V = \frac{\sigma}{T_{p.cp}}.$$

Середній термін служби – це математичне сподівання терміну служби.

Середній термін служби, як і середній ресурс, – це поняття загальне. У якості показників довговічності, передбачають такі: середній термін служби між поточними (капітальними) ремонтами; середній термін служби до списання (повний термін служби).

Середній термін служби оцінюється математичним сподіванням терміну служби і визначається наближено як середня величина за певними формулами.

Статистичну оцінку для середнього терміну служби визначають за формулою

$$T_{сл.ср} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{сл.i}.$$

Імовірнісне визначення

$$T_{сл.ср} = \int_0^{\infty} tf(t)dt,$$

де  $T_{сл.i}$  – термін служби  $i$ -го виробу.

*Гамма-процентний ресурс* – це сумарне напрацювання, протягом якого об’єкт не досягає граничного стану з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

Статистичну оцінку гамма-процентного ресурсу визначають за формулою.

$$1 - F(T_{p\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

Оскільки

$$1 - F(T_{p\gamma}) = P(T_{p\gamma}),$$

то

$$P(T_{p\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

Імовірнісне визначення

$$P(T_{p\gamma}) = \int_{T_{p\gamma}}^{\infty} f(T_{p\gamma}) dt,$$

де  $f(T_{p\gamma})$  – значення функції розподілу ресурсу при сумарному напрацюванні, що дорівнює  $T_{p\gamma}$ ;

$\gamma$  – гарантована ймовірність (виражена в процентах) того, що до закінчення напрацювання  $T_{p\gamma}$  об’єкт не перейде в граничний стан.

Коли  $\gamma = 100\%$ , гамма-процентний ресурс часто називають *встановленим ресурсом*, а в разі  $\gamma = 50\%$  – *медіанним ресурсом* (він наближається до середнього).

Відомо, що ресурс підпорядковується нормальному закону розподілу, а довірча ймовірність розподілу – правилу  $3\sigma$ . На практиці стосовно ресурсу нижню довірчу ймовірність можна оцінити з достатнім ступенем точності за статистичними даними. Вона (або величина  $3\sigma$ ) і визначає встановлений ресурс з імовірністю  $\gamma \rightarrow 100\%$  за аналогією з гамма-процентним напрацюванням до відмови (рис. 7.3).

Користуючись графіком щільності розподілу  $f(T_{p\gamma})$  та  $P(T_{p\gamma})$ , можна побудувати точку  $B$ , як показано на рис. 8.3. Сполучивши плавною кривою точку  $A$  з точкою  $B$  і подовживши її за аналогією з віткою  $AB$ , отримаємо графік  $P(T_{p\gamma})$

Його можна побудувати і за статистичними даними. Цей графік є необхідним для визначення  $T_{\rho\gamma}$  при будь-якому значенні  $\gamma$ . Як приклад, на графіку показано визначення гамма-процентного ресурсу при  $\gamma = 80\%$  ( $P(T_{\rho\gamma}) = 0,8$ ).

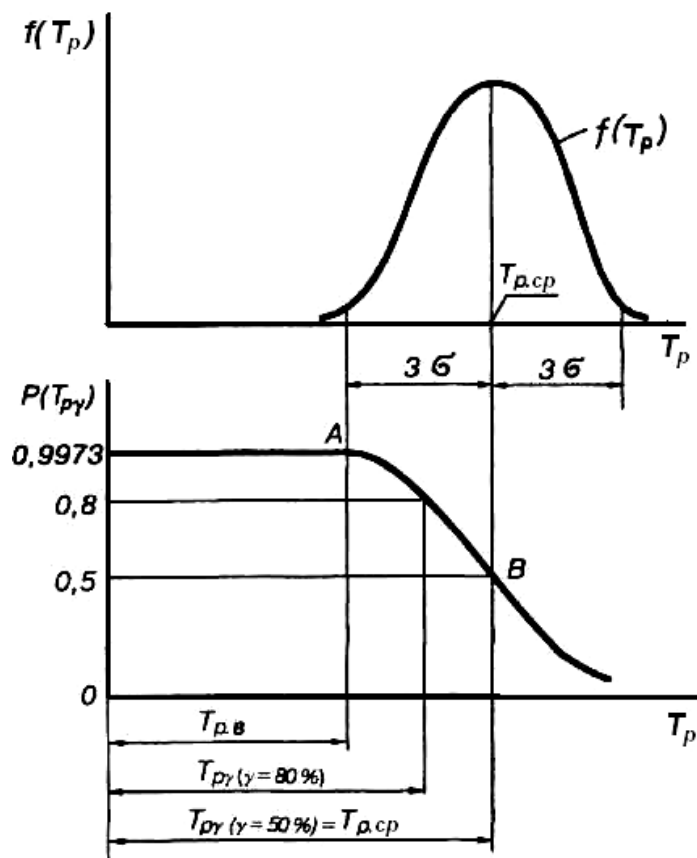


Рисунок 7.3 – Графоаналітичний метод визначення гамма-процентного ресурсу

Встановлення гамма-процентного ресурсу дає певну технічну гарантію придатності об'єкта для застосування за призначенням протягом зазначеного сумарного напрацювання.

Вибір гамма-процентного ресурсу залежить від особливостей виробу та техніко-економічних характеристик, найважливіші з яких пов'язані з аналізом наслідків відмови. Так, якщо відмова може призвести до невиконання спеціальних завдань або до небезпеки для життя людей, що працюють з виробом, то значення  $\gamma$  беруть близьким до 100%. Це – *встановлений ресурс*.

Для виробів серійного та масового виробництва, що не впливають на безпеку експлуатації, в тому числі і для сучасних машин, найчастіше використовують 80 %-й ресурс.

Медіанний ресурс ( $\gamma = 50\%$ ) статистично визначають як середній член упорядкованої вибірки ресурсу об'єму  $N$  (при непарному  $N$ ) або як середнє арифметичне двох середніх членів вибірки об'єму  $N$  (при парному  $N$ ):

$$T_{p,0,5} = t \frac{N+1}{2}, \quad N - \text{парне}; \quad T_{p,0,5} = \frac{t_{N/2} + t_{N/2+1}}{2}, \quad N - \text{непарне.}$$

Упорядкованим ряд вважається в тому разі, якщо кожний наступний член вибірки більший за попередній:

$$t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_n.$$

Медіанний ресурс застосовують лише як доповнення ще хоча б до одного гамма-процентного ресурсу. Наприклад, встановлюють, що  $T_{p,0,5} = 1000$  год, а  $T_{p,90} = 650$  год. При розподілі ресурсу, близькому до нормального закону розподілу, медіанний ресурс майже збігається з середнім, а при  $\gamma = 100\%$  – з призначеним ресурсом.

Статистичну оцінку гамма-процентного ресурсу в найпростішому випадку виконують з упорядкованої вибірки ресурсів  $k$  об'єктів:

$$T_{p\gamma} = \frac{t_k + t_{k+1}}{2},$$

де  $t_k$  – значення ресурсу  $k$  – го об'єкта впорядкованої вибірки;

$t_{k+1}$  – наступне після  $t_k$  значення ресурсу в упорядкованій вибірці  $k$  округляють до менших цілих значень.

*Гамма-процентний термін служби* – це календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягає граничного стану з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках. При  $\gamma = 100\%$  гамма-процентний термін служби (за аналогією з гамма-процентним ресурсом) називається встановленим терміном служби, а при  $\gamma = 50\%$  – медіанним.

Фізичний зміст цих показників і математичний апарат для оцінки їх аналогічні наведеному вище для гамма-процентного ресурсу.

## ТЕМА 8. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ ТА ЗБЕРЕЖУВАНOSTІ МАШИН

### 8.1. Ремонтопридатність машин і механізмів

Конструкція машини істотно впливає на показники надійності не лише з огляду на довговічність окремих елементів та складальних одиниць, а й залежно від її пристосованості до ремонту та технічного обслуговування.

Ремонтопридатність традиційно трактують у широкому розумінні – еквівалентно міжнародному термінові *пристосованість до підтримування працездатного стану*. Крім ремонтпридатності у вузькому розумінні, це поняття містить значення: *обслуговуваність*, тобто пристосованість об'єкта до технічного обслуговування, *контролепридатність* та *пристосованість до попередження й виявлення відмов і пошкоджень, а також причин, що їх зумовлюють*.

Ремонтопридатність машин характеризується п'ятьма показниками: ймовірністю відновлення, середнім часом відновлення, гамма-процентним часом відновлення, інтенсивністю відновлення та середньою трудомісткістю відновлення.

*Ймовірність відновлення* – це ймовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищує заданого значення.

Час відновлення містить час, затрачений на виявлення причини та усунення наслідків відмови.

Згідно з означенням, можна записати:

$$P(t_s) = P(T_s \leq t_s).$$

де  $t_s$  – заданий (нормативний) час відновлення.

Відлік часу відновлення працездатності об'єкта починають з моменту виявлення ознак виникнення відмови і закінчують завершенням випробувань, що здійснюються для того, аби переконатися у належному відновленні працездатності об'єкта. До часу відновлення зазвичай не відносять наперед заплановані (адміністративні) перерви у виконанні ремонту, а також перерви, зумовлені відсутністю потрібних запасних частин і засобів. Математичний



апарат для визначення ймовірності відновлення в заданий час аналогічний до застосовуваного для визначення ймовірності безвідмовної роботи.

В усіх подібних розрахунках визначають імовірність того, що розглядувана випадкова величина виявляється меншою, ніж задане значення.

*Середній час відновлення* – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови. Подібно до показника ремонтпридатності та ймовірності відновлення середній час відновлення істотно залежить від умов, за яких воно відбувається. Середній час відновлення визначають як звичайну середню величину:

$$T_{\text{с.ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{ср}i};$$

або

$$T_{\text{с.ср}} = \int_0^{\infty} t_{\text{ср}} f(t_{\text{ср}}) dt.$$

*Гамма-процентний час відновлення* – це час, протягом якого відновлення працездатного стану об'єкта буде здійснено з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

Фізичний зміст цього показника та математичний апарат для його оцінки не відрізняються від гамма-процентного ресурсу.

*Інтенсивність відновлення* – це умовна щільність імовірності відновлення працездатного стану об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла.

Фізичний зміст цього показника та математичний апарат для його оцінки такі самі, як і для показника інтенсивності відмов.

У загальному вигляді можна записати:

$$\lambda(t_{\text{ср}}) = \frac{Q(t_{\text{ср}}, t_{\text{ср}} + \Delta t_{\text{ср}})}{\Delta t_{\text{ср}}},$$

для оцінки параметричним способом

$$\lambda(t_{\text{ср}}) = \frac{f(t_{\text{ср}})}{P(t_{\text{ср}})}.$$

*Середня трудомісткість відновлення* – це математичне сподівання трудомісткості відновлення об'єкта після відмови:

$$S_{e.ср} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{ei},$$

де  $S_{ei}$  – трудомісткість відновлення  $i$ -го об'єкта.

Або

$$S_{e.ср} = M[S_e] = \int_0^{\infty} f(S_e) ds.$$

Методи визначення показників експлуатаційної технологічності та ремонтпридатності при випробуваннях нових і модернізованих виробів автомобільної техніки наведено в стандарті, який можна використати і для інших машин, у тому числі будівельних. У ньому подано методику оцінки питомих оперативних трудомісткостей технічних обслуговувань та ремонтів, а також коефіцієнтів разової оперативної трудомісткості та доступності виробів при технічному обслуговуванні та ремонті.

Крім показників тривалості та трудомісткості ТО і ремонтів, стандартом передбачено вартісні показники ТО та ремонту, а також ряд коефіцієнтів: доступності, взаємозамінюваності, легкознімності, уніфікації та стандартизації.

Специфічна особливість ремонтпридатності машини полягає у тому, що сконструювати простий виріб такого самого призначення важче, ніж складний. Перевагу завжди має той виріб, який відповідає вимогам ТУ за найпростішої конструкції з мінімальною кількістю спряжень і деталей.

При конструюванні виробу на його ремонтпридатність впливають такі фактори:

- загальне компонування машини з позицій доступності до її вузлів і механізмів для контролю їхнього стану, обслуговування та проведення ремонтних робіт;
- простота розбирання та монтажу вузлів і спряжень, насамперед таких, що мають малу надійність;
- застосування принципу агрегування, тобто розчленування машини на окремі агрегати, складальні одиниці, блоки;

- використання стандартних складальних одиниць та елементів;
- застосування принципу уніфікації при конструюванні близьких за призначенням та іншими параметрами машин;
- застосування принципів автоматичного підналагодження та компенсації спрацювання, а також автоматизації профілактичних операцій;
- простота виявлення відмов або пошкоджень за рахунок вбудованих приладів, що контролюють вихідні параметри машини;
- можливість проведення діагностики стану машини, регулювань простими методами та засобами без залучення висококваліфікованого персоналу.

На доповнення до стандартних показників О. С. Проніков додатково ввів коефіцієнт  $\beta$  для оцінки ремонтпридатності складальної одиниці, який визначають хронометражем процесу складально-розбиральних робіт або за формулою

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{c_i} + S_{p_i}) Q(T_{p.cp})}{S_c + S_p Q(T_{p.cp})},$$

де  $n$  – кількість елементів у вузлі;

$S_{c_i}$  – трудомісткість складальних робіт для ремонту  $i$ -го елемента;

$Q(T_{p.cp})$  – імовірність відмови даного елемента в міжремонтний період;

$S_c$  – трудомісткість складання, розбирання та вивірення, що припадає на дану групу елементів при одночасному ремонті складальної одиниці;

$S_p$  – трудомісткість ремонту деталей складальної одиниці.

Коефіцієнт  $Q(T_{p.cp})$  вводять для таких деталей, які за рахунок розсіювання термінів служби не завжди виходять з ладу в міжремонтний період.

## 8.2. Збережуваність

Під час зберігання та транспортування об'єкти зазнають негативного впливу, наприклад коливань температури, вібрації, дії атмосферних опадів або просто вологого повітря. Через це об'єкт може опинитися в непрацездатному і навіть у граничному стані. *Збережуваність об'єкта* характеризується здатністю

протистояти негативному впливу умов і тривалості його зберігання та транспортування.

Залежно від умов і режимів застосування об'єкта вимоги до збережуваності ставлять по-різному. Для деяких класів об'єктів (наприклад, приладів безпеки) може бути поставлена вимога, аби після зберігання об'єкт перебував у такому самому стані, що й на момент початку зберігання. За реальних умов погіршуються параметри, які характеризують працездатність об'єкта, а також знижується його залишковий ресурс, але треба, щоб об'єкт (машина) зберігав достатній запас працездатності. Вимоги до показників безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності для об'єкта, що підлягає тривалому зберігання, мають бути вказані в технічному завданні.

Слід розрізняти збережуваність об'єкта до введення в експлуатацію та збережуваність об'єкта в період експлуатації. В другому випадку термін збережуваності входить як складова частина в термін служби. Згідно з ДСТУ 2860–94 є два показники збережуваності: середній і гамма-процентний термін.

*Середній термін збережуваності* – це математичне сподівання терміну збережуваності, який визначають аналогічно середньому терміну служби.

*Гамма-процентний термін збережуваності* – це термін збережуваності, що досягається об'єктом із заданою ймовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

Він визначається аналогічно показникові гамма-процентного терміну служби.

Гамма-процентний (іноді й середній) термін збережуваності записують до технічної документації. Він не ідентичний термінові зберігання, який також вказують у технічній документації.

### **8.3. Оцінка надійності парку машин (комплексні показники надійності)**

Характерною особливістю проблеми надійності, як уже зазначалося, є її комплексність. Лише сукупне вивчення всіх показників, що характеризують

надійність і пов'язані конструкцією, виробництвом та експлуатацією машин, дає змогу забезпечити потрібний рівень надійності.

Комплексні показники надійності, на відміну від одиничних, характеризують одночасно кілька властивостей об'єкта, однак і вони не окреслюють увесь комплекс властивостей надійності об'єкта, тому їх слід розглядати сукупно з одиничними показниками надійності.

Стосовно сучасних машин передбачено такі комплексні показники: коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, коефіцієнт оперативної готовності та коефіцієнт збереження ефективності.

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

Коефіцієнт готовності  $K_2$  є середньою величиною, що характеризує готовність об'єкта до застосування за призначенням тільки щодо його працездатності, отже, означає ймовірність того, що об'єкт буде в працездатному стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не заплановано.

Коефіцієнт готовності статистично визначається відношенням сумарного часу перебування спостережуваних об'єктів у працездатному стані до тривалості експлуатації цих об'єктів. Під тривалістю експлуатації в цьому разі розуміють час, що складається з інтервалів часу роботи і відновлення, які послідовно чергуються. Час простоїв у ТО, ремонтах та з організаційних причин не враховується.

На підставі визначення можна записати:

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^N T_{роб_i}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r (T_{роб_i} + T_{в_іj})}$$

Якщо працездатний об'єкт не простоє, то рівняння можна записати так

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r T_{в_іj}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r (T_{в_іj} + T_{в_іj})}$$

де  $N$  – кількість об'єктів, поставлених під спостереження;

$T_{робі}$  – час перебування  $i$ -го об'єкта у працездатному стані;

$n$  – кількість елементів у вузлі;

$r$  – кількість відмов  $i$ -го об'єкта;

$T_{відij}$  – час напрацювання  $i$ -го об'єкта на  $j$ -ту відмову;

$T_{вij}$  – оперативний час відновлення  $i$ -го об'єкта після  $j$ -ї відмови.

Відносно одного об'єкта за умови, що відновлення об'єкта, який відмовив, починається негайно, коефіцієнт готовності розраховують за формулою

$$K_z = \frac{T_{від}}{T_{від} + T_{\epsilon}}$$

*Коефіцієнт технічного використання* – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані та простоїв, зумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той самий період.

Коефіцієнт технічного використання характеризує частку часу перебування об'єкта в працездатному стані відносно загальної тривалості експлуатації:

$$K_{т.в} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{робі}}{NT_{екс}}$$

де  $T_{екс}$  – середня тривалість експлуатації машини, яка складається з інтервалів часу роботи  $T_p$ , технічного обслуговування  $T_{то}$  та ремонтів  $T_{рем}$  ( $T_{екс} = T_p + T_{то} + T_{рем}$ ). Тут час роботи  $T_p$  – час напрацювання на відмову  $T_{від}$ . Під  $T_{рем}$  слід розуміти час відновлення при раптових відмовах  $T_{р.від}$ , час перебування в поточному  $T_n$  і капітальному  $T_k$  ремонтах ( $T_{рем} = T_{р.від} + T_n + T_k$ ).

Якщо фактичний час експлуатації  $T_{екс}$  різний для кожного виробу (на практиці це трапляється саме так), то формула набуває вигляду

$$K_{т.в} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{робі}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r (T_{відij} + T_{вij}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ТО}} T_{ТОij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{П}} T_{Пij} + \sum_{i=1}^N T_{Кi}}$$

де  $T_{TOij}$  – час напрацювання  $i$ -го об'єкта на  $j$ -е ТО;

$T_{Пij}$  – час напрацювання  $i$ -го об'єкта до  $j$ -го поточного ремонту;

$T_{Ki}$  – час напрацювання  $i$ -го об'єкта до капітального ремонту.

*Коефіцієнт оперативної готовності* – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім періодів, що плануються, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не планується, і, починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

Під *режимом очікування* розуміють перебування об'єкта при повному чи полегшеному навантаженні без виконання основних (робочих) функцій. У період очікування можливе виникнення відмов відновлення працездатності об'єкта. Необхідність у використанні об'єкта виникає раптово, після чого потрібне безвідмовне виконання об'єктом основних функцій протягом часу  $i$ .

*Коефіцієнт збереження ефективності* – це відношення значення показника ефективності використання об'єкта за призначенням протягом певної тривалості експлуатації до номінального значення цього показника, розрахованого за умови, що відмови об'єкта протягом того самого періоду не виникають.

Отже, коефіцієнт збереження ефективності характеризує ступінь впливу відмов на ефективність його застосування за призначенням.

Поняття ефективності для різних об'єктів різне. Точний зміст показника (показників) ефективності задається технічним завданням і вводиться в нормативно-технічну і (або) конструкторську (проектну) документацію.

Для будівельних машин, наприклад, їх ефективність найповніше пояснюється показником вартості одиниці продукції  $B_{од}$ :

$$B_{од} = \frac{B_{м-зм}}{П_{е.зм}},$$

де  $B_{м-зм}$  – вартість машино-зміни, умовних грошових одиниць;

$П_{е.зм}$  – експлуатаційна продуктивність машини за зміну.

Отже, коефіцієнт збереження ефективності

$$K_e = \frac{B_{од.ф}}{B_{од.н}},$$

де  $B_{од.ф}$  та  $B_{од.н}$  – відповідно фактична та номінальна вартість одиниці продукції.

Комплексні показники надійності можна виразити через одиничні показники.

Так, коефіцієнт готовності парку однотипних машин можна виразити через середній ресурс  $T_{p.ср}$  та час відновлення  $T_в$ :

$$K_e = \frac{NT_{p.ср}}{NT_{p.ср} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r T_{вij}},$$

де  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r T_{вij}$  – сумарний час відновлення працездатності машин після відмов між плановими ремонтами за період до першого капітального ремонту, год;

$NT_{p.ср} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r T_{вij}$  – сумарне напрацювання машини до першого капітального ремонту, год.

Коефіцієнт технічного використання парку однотипних машин можна визначити за формулою

$$K_{т.в} = \frac{NT_{p.ср}}{NT_{p.ср} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r T_{вij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NTO} T_{ТОij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NII} T_{IIij} + \sum_{i=1}^N T_{Кi}}.$$

## ТЕМА 9. РОЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НАДІЙНОСТІ

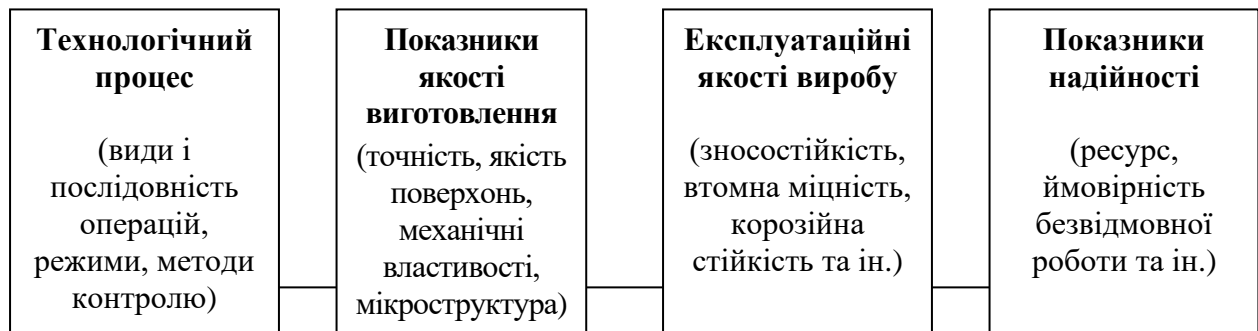
### 9.1. Зв'язок параметрів технологічного процесу з показниками надійності

Задачі технологічного процесу (ТП) виготовлення, складання та контролю виробів – забезпечити необхідний рівень якості (в т.ч. надійності) з найменшими затратами часу та матеріальних ресурсів.

Залежність показників надійності від рівня ТП досить складне і містить протиріччя. Вона може бути представлена у вигляді наступної схеми:



Всі компоненти технологічного процесу визначають його вихідні параметри і в перше чергу показники якості виробу, що обумовлені конструктором в технічних умовах (ТУ), але для вирішення питань надійності цього недостатньо, оскільки показники надійності визначаються з експлуатаційних властивостей виробу.



Залежність експлуатаційних властивостей виробу від показників якості готового виробу дуже складна:

По-перше, процес втрати працездатності, маючи певну фізичну природу, підкоряється закономірностям випадкових функцій, оскільки умови експлуатації і виготовлення нестабільні.

По-друге, через складність більшості ТП і побічних явищ, що при цьому виникають важко виявити всі ті параметри процесу, що дійсно впливають на експлуатаційні властивості виробу.

По-третє, розкриття залежностей між якістю виробу і його експлуатаційними властивостями базується на вивченні фізичних процесів руйнування матеріалів.

Отже, ТП безпосередньо і суттєво впливає на показники надійності, хоча ці зв'язки складні та багатоетапні і не є очевидними.

Технологічні методи забезпечення надійності мають таке саме велике значення як і експлуатаційні та конструктивні, оскільки саме в процесі виготовлення забезпечується закладена конструктором надійність.

Практично всі відмови в тій чи іншій мірі пов'язані з технологією, оскільки саме вона визначає рівень якості і всі властивості виробу.

Певна частина цих відмов може відноситись до недопустимих, коли їх характер або швидкість протікання процесу пошкодження не відповідає вимогам, що ставляться до виробу.

## **9.2. Класифікація причин, що викликають недопустимі відмови з вини технології**

*Перша група причин* пов'язана з необґрунтованістю технічних вимог на параметри виробу, які часто не регламентують значень параметрів поверхневого шару і обмежуються значенням шорсткості і твердості. Не завжди враховується послідовність і структура операцій, режими і методи обробки, які вибираються в основному, з умови одержання максимальної продуктивності. В результаті різні технологічні процеси призводять до виготовлення деталей різного рівня надійності.

Тому, чим вищі вимоги до надійності виробів, тим більша кількість параметрів повинна бути обумовлена технічними вимогами. Необхідно також, щоб методи випробувань виробів давали оцінку рівня їх надійності.

*Друга група причин*, що призводить до недопустимих відмов пов'язана з недостатньою надійністю самого ТП. Технологічний комплекс є складною динамічною системою з великим числом взаємозв'язків. Щоб забезпечити виготовлення якісної і надійної продукції, ця система сама повинна володіти високою надійністю, що пов'язана зі ступенем досконалості ТП, його стабільністю, методами контролю та іншими факторами.

*Третя група причин* виникнення недопустимих відмов пов'язана з залишковими і побічними явищами, які викликає ТП, оскільки супроводжується, як правило, значними силовими і температурними впливами на деталь при високих вимогах до точності і продуктивності.

Ці впливи призводять до цілого ряду побічних явищ, що змінюють властивості виробів, створюють в них залишкові напруження, спотворюють структуру матеріалу, призводять до появи внутрішніх дефектів.

### 9.3. Вплив параметрів технологічного процесу на зносостійкість поверхонь

Технологічний процес виготовлення безпосередньо впливає на таку основну експлуатаційну властивість, як зносостійкість поверхні. На неї впливає хімічний склад, структура і механічні властивості матеріалу, які залежать від металургійних процесів одержання матеріалів, від термічних та термохімічних методів обробки поверхонь.

Крім того зносостійкість залежить від геометричних і фізико-хімічних параметрів поверхневого шару.

Необхідно враховувати, що зв'язки між технологічними і експлуатаційними параметрами мають імовірнісну природу через розсіювання складу матеріалу, положення деталі під час обробки та інших причин, що визначають точність і стабільність процесу.

На рисунку 9.1 представлена схема впливу розсіювання деякого параметра  $X$  виробу, забезпеченого в результаті даного технологічного процесу, на швидкість руйнування (зносу)  $\gamma$ , яка зв'язана з цим параметром функціональною залежністю (функція випадкового аргументу)  $\gamma = f(X)$ .

Наприклад, для багатьох видів зносу поверхонь, параметром, що впливає на швидкість зношування  $\gamma$ , буде твердість матеріалу  $X = H_v$ , вони зв'язані залежністю  $\gamma = \frac{k}{H_v}$ , де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від матеріалу і умов зношування.

Розсіювання значень твердості матеріалу призводить до відповідного розсіювання швидкостей зношування, а можливість одержання деталей з недопустимо низьким значенням  $X_H$ , швидкість зношування  $\gamma_H$  буде недопустимо високою, що може призвести до передчасної відмови.

Природно, що підвищення стабільності технологічного процесу і контроль за недопустимістю виготовлення деталей з параметрами нижче  $X_{\min}$  забезпечать випуск надійних виробів, однак це питання в реальності є досить складним.

По-перше, часто невідома функціональна залежність між параметром  $X$  та швидкістю  $\gamma$  процесу руйнування, тому допуск на цей параметр встановлюється досить приблизно, на основі досвіду експлуатації виробів подібного типу.

По-друге, на величину  $\gamma$  впливають на один, а декілька технологічних параметрів, причому не всі вони підлягають контролю.

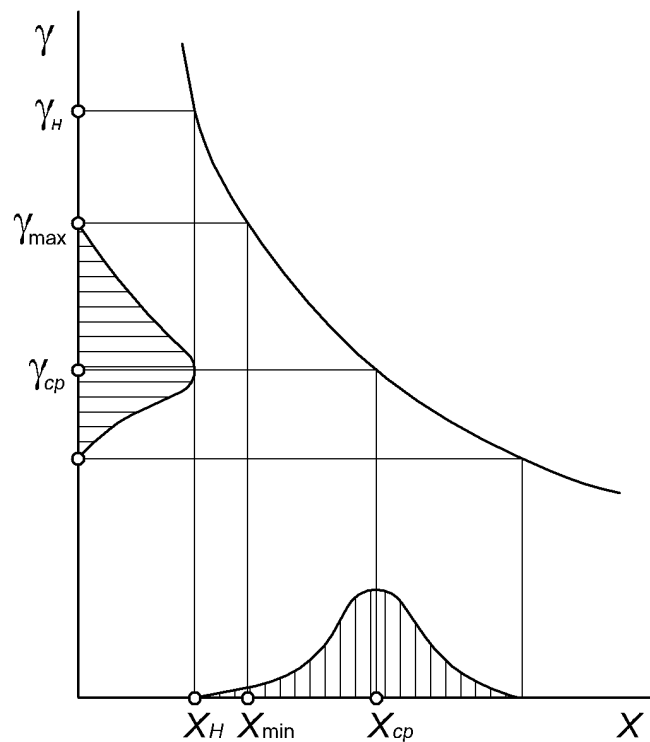


Рисунок 9.1 – Залежність швидкості  $\gamma$  руйнування (зносу) від параметра  $X$ , що залежить від технологічного процесу

Наприклад, на швидкість зношування не змащених шорстких поверхонь впливає не тільки твердість матеріалу  $H_v$ , але і характеристика шорсткості поверхні  $(v + 1)\text{tg}\alpha$ , де  $v$  – показник опорної поверхні  $v = 1, 2, \dots, 2$ , і  $\alpha$  – кут нахилу нерівностей, тоді  $X = H_v(v + 1)\text{tg}\alpha$ .

Чим більше факторів, що впливають на  $X$ , тим більша дисперсія, в результаті збільшується ймовірність виготовлення деталей з недопустимим значенням  $\gamma_H$ . В реальній ситуації число параметрів, що контролюється менше, ніж число факторів, що впливають на надійність.

#### **9.4. Вплив параметрів технологічного процесу на втомну міцність деталей**

На втомну міцність деталей чинять вплив як характеристики матеріалу, так і стан його поверхневих шарів і наявність дефектів.

Наприклад при наявності розтягуючих залишкових напружень границя витривалості зменшується, а при наявності стискаючих – збільшується.

В загальному випадку границя витривалості підвищується з покращенням якості поверхневого шару. Крім цього, на неї впливає напрямок слідів обробки: при їх співпаданні з напрямком дії головного напруження границя втоми вища.

Фінішна обробка поверхні, яка в основному визначає конфігурацію мікроскопічних рисок і механічні властивості поверхневого шару, суттєво впливає на границю витривалості навіть при однаковому класі шорсткості.

Так, при шліфуванні деталей алмазними кругами опір втомному руйнуванню на 20...45 % вище, ніж при шліфуванні абразивними.

#### **9.5. Вплив параметрів технологічного процесу на корозійну стійкість виробів**

Для захисту металів від корозії широко застосовують різноманітні покриття: електролітичні, хімічні, полімерні.

Корозійна стійкість покриття залежить не лише від виду покриття, але і від режимів їх нанесення, можливостей контролювати процес.

Корозійна стійкість залежить від таких показників, як суцільність, однорідність покриття за складом, стабільність товщини.

Складні технологічні задачі виникають при застосуванні покриттів, які крім корозійної стійкості повинні мати високу зносостійкість, або забезпечувати опір втомному руйнуванню.

Інтенсивні корозійні руйнування характерні для конструкцій, які працюють у рідинних середовищах, що викликають електрохімічну корозію.

Особливо небезпечний вид руйнувань – корозійне розтріскування, яке виникає при одночасній дії корозійного середовища і статичних чи повторно-статичних навантажень. Воно виникає в зварних швах, де спостерігається

неоднорідність структури. Його можна попередити зняттям залишкових напружень, та виконанням якісного зварного шва без дефектів.

### **9.6. Надійність технологічного процесу**

Технологічний процес – це складна динамічна система, в якій в єдиний комплекс об'єднані обладнання, засоби контролю і керування, допоміжні і транспортні пристрої, обробний інструмент, об'єкти виробництва і люди, що його здійснюють.

Технологічні системи (ТС) з позиції надійності характеризуються специфічними особливостями, які з одного боку утруднюють вирішення поставлених задач, а з іншого – володіють цілим рядом позитивних якостей.

Труднощі в забезпеченні надійності ТП пов'язані з великою складністю ТС, наявністю чисельних і різноманітних взаємозв'язків, з високими вимогами до його надійності.

Так, якщо складна машина складається з  $10^5$  деталей і на кожній деталі в процесі виготовлення контролюється 100 параметрів, то для машини в цілому необхідно контролювати  $10^7$  параметрів. Якщо тільки один параметр з 1000, впливає на надійність, тоді з надійністю машини пов'язано  $10^4$ . Якщо на кожній операції, пов'язаній із забезпеченням даного параметра буде виникати одна відмова на 10000 виробів, то ймовірність безвідмовності технологічного процесу на даній операції повинна складати  $P(t) = 0,9999$ , а це означає, що практично кожна машина в цілому буде мати недопустиму відмову. Це свідчить про те, що до надійності здійснення ТП повинні висуватись надзвичайно високі вимоги.

Разом з тим ТП володіють і такими властивостями, які полегшують задачу забезпечення їх високої надійності.

Це можливість змінювати структуру системи та її елементів – вводити додатковий контроль, розбивати операції на ряд переходів, змінювати режими. Крім цього технологічні системи можуть володіти властивістю саморегулювання і при зміні умов, в яких протікає ТП автоматично, або за допомогою оператора, змінювати свої параметри, забезпечуючи необхідний рівень надійності.

Однією з основних особливостей ТП є зв'язок його якісних і кількісних показників. Завжди доводиться вирішувати дві протилежні задачі: забезпечення високого рівня якості продукції і продуктивності процесу.

Надійність ТП повинна бути забезпечена як за якісними, так і за кількісними показниками.

### **9.7. Забезпечення надійності технологічного процесу**

*Надійність технологічного процесу* – це його властивість забезпечувати виготовлення продукції в заданому обсязі, зберігаючи в часі встановлені вимоги до її якості.

*Точність технологічного процесу* – це його властивість забезпечувати відповідність поля розсіювання значень показника заданому полю допуску виробу і його розміщення.

*Стабільність* – це властивість технологічного процесу зберігати показники якості виготовлення продукції в заданих межах на протязі певного часу.

При розрахунку надійності технологічних систем необхідно виходити з того, що в конструкторській документації однозначно задані показники якості готового виробу, а задача технолога – оцінити, на скільки ТП виготовлення забезпечує дотримання встановлених вимог, не розглядаючи технічний рівень самих виробів.

Показники, за якими оцінюється надійність ТП ті самі, що і для оцінки надійності будь-якої системи.

При цьому, під безвідмовністю розуміють ймовірність знаходження його технологічних параметрів в допустимих межах на протязі періоду часу, що розглядається.

Відмови технологічних систем можуть бути поступовими і раптовими.

*Поступові* – пов'язані з процесами зносу технологічного обладнання, оснащення, інструменту, засобів контролю, з температурними деформаціями, тощо.

*Раптові* – можуть бути викликані помилками персоналу, дефектами в заготовках, поганою якістю контролю.

Ці відмови можна звести до мінімуму за допомогою ефективної системи управління якістю.

### **9.8. Формування показників надійності технологічного процесу**

Розглянемо схему оцінки надійності технологічного процесу, що складається з  $n$  послідовних операцій. В результаті цього технологічного процесу необхідно забезпечити знаходження  $m$  параметрів  $X_1; X_2; \dots; X_m$  в межах допуску. Ймовірність  $P(t)$  виходу будь-якого з параметрів за межі допуску на протязі заданого проміжку часу  $t = T$  визначають безвідмовність даного технологічного процесу.

Оскільки вихідні параметри формуються в результаті послідовно виконуваних операцій, які мають свої вихідні параметри, кожна операція також характеризується ймовірністю  $P_i(t)$  виконання технологічного процесу.

Однак ймовірність безвідмовного виконання технологічного процесу на всьому ланцюжку не дорівнює добутку  $P_i(t)$  для кожної операції, а зазвичай вище цього значення через певні особливості формування вихідних параметрів, які полягають у наступному.

1. Основне формування вихідних параметрів відбувається на кінцевих (фінішних) операціях, а параметри, що контролюються на попередніх етапах змінюються і не відіграють суттєвої ролі (*I група*). Виключенням є характеристики матеріалу.

2. Більшість параметрів фінішних операцій безпосередньо визначають надійність технологічного процесу. Саме ймовірність їх одержання в межах допуску багато в чому визначить надійність всього технологічного процесу (*II група*).

3. Разом з тим існують такі параметри фінішних операцій, на забезпечення яких впливає характер попередніх операцій. Тут має місце так звана технологічна спадковість, яка проявляється у впливі якості виконання попередніх операцій на наступні (*III група*). Наприклад порушення точності



обробки центрових отворів ступінчастого вала призведе до виникнення похибок обробки при наступній його обробці у жорстких центрах багаторізевого напівавтомата. Тому, частина вихідних параметрів фінішної операції функціонально пов'язана з параметрами попередніх операцій.

Ймовірність безвідмовного виконання технологічного процесу виразиться як добуток відповідних ймовірностей за групами відмов. При цьому відмови III групи повинні розглядатися як залежні, зв'язані з імовірністю їх виникнення на попередніх операціях.

Дана оцінка надійності процесу не враховує ролі і можливостей контрольних операцій, які з точки зору схемної надійності відіграють роль резервних елементів та суттєво підвищують надійність технологічного процесу.

Однак, ці можливості є обмеженими. По-перше, необхідно прагнути до мінімуму контрольних операцій, наявність яких вимагає додаткових матеріальних витрат. По-друге, сам процес контролю має певний рівень надійності, і по-третє, не всі параметри і не всі вироби піддаються контролю, а відбраковка великої кількості виробів недопустима з економічних міркувань.

Розглянемо кінцевий результат формування  $m$  вихідних параметрів певного технологічного процесу (див. рис. 9.2), вважаючи, що для кожного з параметрів визначена ймовірність  $P_{xi}$  їх одержання в межах допуску. Ця ймовірність враховує належність параметра до однієї з трьох груп та наявність для окремих з них операцій проміжного контролю. В кінці технологічного ланцюжка для ряду параметрів проводиться приймальний контроль, ефективність якого характеризується ймовірністю  $P_K$  відбракування виробів, що мають параметри за межами допуску. Контрольні операції не володіють 100 % гарантією у випадку використання статистичних методів контролю та з урахуванням метрологічної надійності контрольних пристроїв.

В цьому випадку у структурній схемі надійності контрольна операція є резервом (дублером) технологічного ланцюжка, ймовірність якої дорівнює  $P_K$ . Тому для оцінки ймовірності безвідмовного виконання технологічного процесу можна записати

$$P(t) = \prod_1^m [1 - (1 - P_{xi})(1 - P_K)]$$

Для неконтрольованих параметрів  $P_K = 1$ , а для абсолютно надійного контролю  $P_K = 0$ .

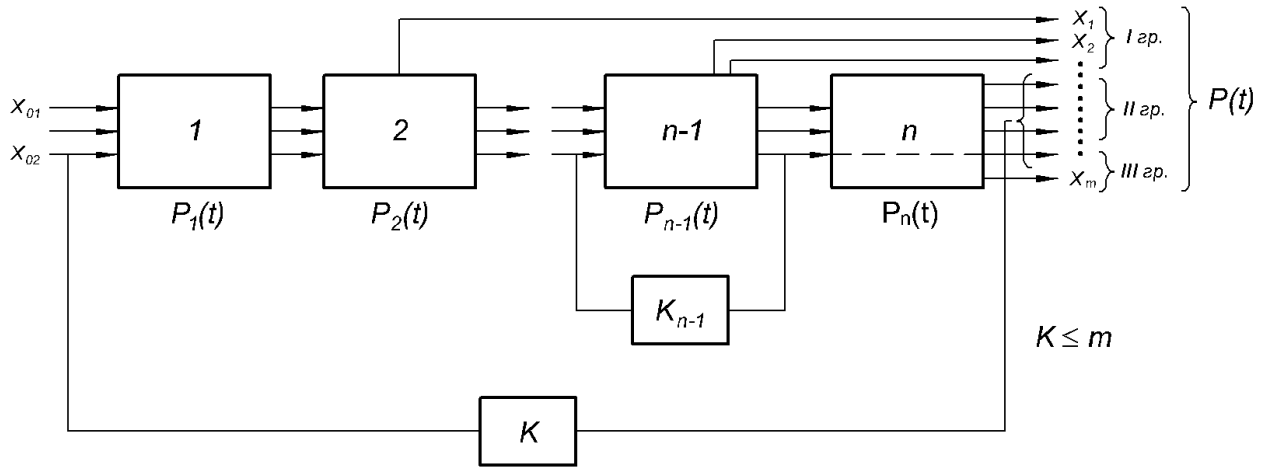


Рисунок 9.2 – Схема формування показників надійності технологічного процесу

### 9.9. Створення запасу надійності технологічного процесу

В ряді випадків, особливо при освоєнні нових зразків машин відмови, пов'язані з технологією виникають тому, що її рівень не відповідає високим вимогам до виробу, не створено запас надійності і параметри технологічного процесу близькі до граничних.

Технологічне обладнання, методи контролю, організація технологічного процесу вже перестають відповідати вимогам, що висувуються до виготовлення виробів з високими якісними показниками. Наприклад, при підвищенні складності виробів великого значення набувають допуски не лише на точність розмірів, але і на точність взаємного розміщення окремих поверхонь.

Тенденції розвитку сучасних технологічних процесів, мають такі характерні напрями, як підвищення прецизійності процесу, розвиток методів зміцнюючої технології, застосування покриттів, отримання надчистих і однорідних матеріалів з високою опірністю зовнішнім впливам, отримання високої якості поверхневого шару та інші, які є необхідною умовою для виготовлення надійної продукції.

Технологічні процеси при ремонті машин також повинні відповідати рівню технологічних процесів при її виготовленні. Аналіз відмов машин у багатьох випадках вказує на підвищення їх інтенсивності після проведення ремонтних операцій. Це пов'язано з тим, що в наслідок ряду причин (відсутність відповідного технологічного оснащення, недостатньо висока кваліфікація робітників, відсутність технічної документації, специфічні умови ремонту і т. д.) технологічні процеси при ремонті машин не забезпечують виконання всіх ТУ на виріб і його елементи або володіють іншими характеристиками при тих самих контрольованих параметрах. Технологічні процеси, вживані при ремонті машини, повинні вибиратися і здійснюватися з тими ж високими вимогами, як і при виготовленні виробів.

Ті галузі промисловості, до виробів яких висуваються підвищені вимоги, особливу увагу при впровадженні нових технологічних процесів приділяють їх надійності. Так, наприклад, ширше застосування точних виливків в авіаційній промисловості привело до необхідності проведення таких заходів як строгий контроль матеріалів, що надходять зі сторони, підвищення точності прес-форм, створення досконаліших технологічних процесів монтажу моделей, приготування покриттів і виготовлення форм, ретельний контроль шихти, плавлення, заливки, очистки виливків і їх термообробки, механічні випробування взірців, систематична перевірка контрольно-вимірювальної апаратури та інструменту, тощо.

Вирішальний вплив на надійність технологічного процесу і створення запасу надійності має автоматизація технологічного процесу, яка створює умови для стабільного протікання технологічного процесу, забезпечує управління його ходом і вищу однорідність виробів, чим при виготовленні за участю людини. Можливості людини щодо прийняття різноманітних цілеспрямованих рішень з метою отримання виробів вищої якості мають також іншу сторону – вірогідність здійснення таких дій, які приведуть до погіршення показників якості. Так, наприклад, через стомлюваність можливе виготовлення верстатником неточної деталі і не виявлення браку контролером. Автоматизація технологічного процесу, коли всі операції здійснюють механізми без безпосередньої участі

робітника, не тільки сприяє підвищенню продуктивності процесу, але і є ключем для вирішення проблеми якості. Технологічний процес стає стабільнішим, він не схильний до різких відхилень від встановленого рівня якості, в нього органічно можуть бути включені функції контролю і управління ходом процесу.

Найбільш високий ефект може бути досягнутий, якщо процес володіє функціями самоналагодження (адаптації), коли при зміні умов, в яких він здійснюється, автоматично змінюються і параметри процесу. Створення самоналагоджувального і саморегульованого обладнання, яке подібно до живих організмів володіє функціями пристосування до змінних умов роботи і відновлення втраченої працездатності, дозволить всій технологічній системі здійснювати свої функції тривалий час, незалежно як зовнішніх впливів, так і від процесів, що протікають в самих машинах.

Ця проблема тісно пов'язана із застосуванням і розвитком методів активного контролю і створенням нового типу технологічного устаткування.

Застосування методів і засобів автоматизації не лише для отримання кількісних показників технологічного процесу (його продуктивності), але і для забезпечення його якісних параметрів протягом тривалого періоду – прогресивний напрям технологічного аспекту надійності.

## **ТЕМА 10. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МАШИН**

### **10.1. Класифікація технологічних засобів підвищення надійності машин**

1. Зміцнення пластичним деформуванням.
  - 1.1. Дробоструменевий наклеп.
  - 1.2. Наклеп відцентровими зміцнювачами.
  - 1.3. Обкатування роликками та кульками.
  - 1.4. Зміцнення чеканкою.
  - 1.5. Зміцнення при точінні спеціальним різцем.
  - 1.6. Розкатування отворів роликками та кульками.

2. Термомеханічна обробка.
3. Хіміко-термічна обробка.
  - 3.1. Цементация.
  - 3.2. Азотування.
  - 3.3. Ціанування.
  - 3.4. Борування.
4. Поверхнєве гартування.
  - 4.1. Газове.
  - 4.2. СВЧ.
5. Наплавлення та напилювання матеріалу на робочі поверхні.
  - 5.1. Ручне дугове Наплавлення.
  - 5.2. Наплавлення під флюсом.
  - 5.3. Індукційне Наплавлення.
  - 5.4. Плазмове Наплавлення.
  - 5.5. Наплавлення матеріалом.
6. Електролітичні покриття.
  - 6.1. Хромування.
  - 6.2. Нікелювання.
  - 6.3. Цинкування.
  - 6.4. Борування.
  - 6.5. Кадміювання.
  - 6.6. Емалювання.
  - 6.7. Антифрикційні покриття.
7. Хімічні покриття.
  - 7.1. Нанесення покриття металу.
  - 7.2. Сульфідкування.
  - 7.3. Фосфатування.
  - 7.4. Оксидування.
8. Покриття полімерними матеріалами.
  - 8.1. Вихрове напилювання.
  - 8.2. Газополуменеве напилювання.

- 8.3. Струменеве напилювання.
- 8.4. Контактне нанесення термоплавких полімерів.
- 8.5. Облицювання полімерним матеріалом.

## **10.2. Зміцнення поверхонь деталей машин пластичним деформуванням (наклепом)**

Основний результат наклепу – утворення залишкових напружень стиску. Наклеп також змінює мікрорельєф поверхні і покращує фізико-механічні властивості поверхневого шару за рахунок підвищення твердості, границі текучості та опору відриву.

Механізми пластичної деформації поділяються на три основні групи:

1. Зсувні процеси.
2. Дифузійні процеси.
3. Процеси, що викликані відносним переміщенням зерен або їх блоків.

Дробоструменевий та відцентрово-кульковий наклеп застосовують для деталей складної форми.

Дана обробка дає можливість досягнути шорсткості поверхні  $R_a$  20...1,25 для м'яких, а  $R_a$  0,16 для твердих ( $HRC_s$  50...60), не залежно від вихідної шорсткості.

Твердість після обробки залежить від режимів. Глибина наклепаного шару  $h_H = 1,5$  мм. Границя втоми підвищується на 20...30 %, а для деталей з концентраторами напружень на 40 - 60 %.

Дробоструменева обробка зубчастих коліс в поєднанні з хіміко-термічними методами дозволяє підвищити їх довговічність в 8...12 разів.

Він також використовується для обробки деталей з кольорових металів, зварних швів.

Для підвищення якості поверхні при дробоструменевій обробці використовують рідину, яку подають в зону обробки. В результаті удар здійснюється через плівку рідини і навантаження більш рівномірно розподіляється по оброблюваній поверхні (гідрогалтування). (Діаметр дробинок 0,1...1 мм, рідина – сульфафризол).

Використовують для обробки відповідальних деталей турбін, компресорів двигунів.

Газоабразивна обробка використовується для обробки ріжучого інструменту, ресор, пружин. Струмień рідини, що містить абразивні частинки спрямовується на оброблювану поверхню. Крім зміцнення поверхні, з неї видаляється дефектний шар. Параметри процесу наступні:

$$V = 50 \dots 70 \text{ м/с}$$

$$R_a = 0,63 \dots 0,08$$

$$h_\delta = 0,1 \text{ мкм}$$

$$\sigma_B \text{ збільшується на } 10 \dots 15 \%,$$

$$h_H = 200 \text{ мкм}$$

$$\text{зносостійкість – на } 25 \dots 30 \%.$$

Зміцнення обкатуванням здійснюють за допомогою спеціального інструменту. Циліндричних деталей – на токарних верстатах, плоских – на стругальних. Дозволяє одержати  $h_H = 0,02 \dots 0,04$  мм твердість підвищується на 25...40%.

Чеканка використовуються для обробки зварних швів та галтелей валів за допомогою пневматичного приводу спеціальним інструментом (бойком) на обробленій поверхні  $h_H$  до 0,35 мм,  $R_a = 12,5$ .

### 10.3. Термомеханічна обробка

Термомеханічна обробка (ТМО) – це поєднання термічної обробки з пластичною деформацією, що дає підвищення механічних властивостей, проводиться при температурі вищій ніж температура рекристалізації.

1. Нагрівання до температури існування аустеніту.
2. Пластичне деформування на 30...40%.
3. Гартування.
4. Низькотемпературний відпуск.

### 10.4. Поверхневе гартування

Процес полягає у нагріванні тонкого поверхневого шару до температури утворення в ньому аустеніту і наступному швидкому охолодженні для забезпечення фіксації дрібногексового мартенситу.

Нагрівання проводять газовим полум'ям, струмами високої частоти (СВЧ), опроміненням електронами, дейтронами.

Нагрівання газовим полум'ям проводять, застосовуючи спеціальні горілки на глибину 1...6 мм після чого деталь негайно охолоджують. В результаті утворюється однорідний загартований шар з поступовою зміною твердості з мінімальним коробленням деталі.

Така обробка дозволяє збільшити твердість поверхневого шару, зносостійкість і втомну міцність. Ресурс збільшується в 3,5...10 разів.

Полуменевому гартуванню піддають зубчасті колеса, шийки валів, ролики, валки холодного прокатування та ін.

Для зняття внутрішніх напружень, що виникають в процесі обробки застосовують відпуск.

Поверхнєве гартування проводять також за допомогою нагріву струмами високої частоти.

Така обробка забезпечує більш високу твердість поверхневого шару. Цей процес легко автоматизувати. Продуктивність його в 2...6 рази вища, ніж при газовому гартуванні.

### **10.5. Наплавлення та напилювання матеріалу на робочі поверхні**

В машинобудуванні широко застосовуються методи нанесення антикорозійного покриття і антифрикційного покриття, які реалізуються наплавленням, металізацією, напилюванням. За допомогою цих методів поверхневому шару піддають практично будь-яких властивостей, незалежно від характеристик вихідного матеріалу. Широко розповсюджені хромування, нікелювання, борування, покриття сталлю та ін.

В практиці машинобудування знаходять застосування такі методи поверхневого зміцнення як плазмове напилювання і наплавлення надтвердими матеріалами в т.ч. карбідами, боридами, окислами. Вони дозволяють до п'яти і більше разів збільшувати термін служби деталей. Можливе застосування комбінованих способів зміцнення, наприклад плазмове напилювання з подальшою термообробкою поверхневого шару.



Досить ефективним методом зміцнення деталей є нанесення на поверхні тертя тонкого шару карбідів титану, вольфраму і деяких інших елементів. Товщина зміцненого шару складає соті долі міліметра, а зносостійкість збільшується в десятки разів.

Прогресивним способом є застосування антифрикційних матеріалів у вигляді комбінації тонкого шару антифрикційного матеріалу зі сталеву основою. Такі матеріали виготовляються у вигляді стрічки безперервними технологічними процесами (сталь-баббіти – заливкою на стрічку, сталь-алюмінієві сплави – спільним прокатуванням, сталь свинцеві та інші бронзи – заливкою або спіканням порошків на стрічці). З таких матеріалів виготовляють вкладиші, втулки, упорні кільця та інші деталі.

## **11. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

### **11.1. Втомне руйнування деталей**

Явище втомного руйнування деталей пов'язане з пластичною деформацією, при якій проходить реалізація різноманітних механізмів взаємодії та зародження втомних тріщин. При цьому значну роль відіграють адсорбція, дифузія і корозія.

Після попередніх досліджень проблеми міцності залізничних осей німецький інженер Август Велер в період з 1852 до 1870 р.р. здійснив перше систематичне дослідження явища втоми металів.

Він встановив, що з амплітудою знакозмінних напружень, які лише трохи менші за статичні граничні напруження, необхідно всього кілька циклів, щоб настало руйнування. Але, якщо амплітуду знакозмінного напруження зменшувати, то число циклів, необхідних для доведення матеріалу до руйнування, зростає.

Ця тенденція зберігається до тих пір, поки рівень знакозмінних напружень не зменшується до величини, що дорівнює приблизно 25 – 33 % від граничного напруження при статичному навантаженні. При цьому рівні знакозмінних

напружень довговічність зразка виявляється практично нескінченною (див. рис. 11.1). Вказане граничне напруження назвали границею витривалості матеріалу.

Таким чином, експериментальні дослідження і чисельні поломки деталей машин вказують, що при змінних навантаженнях матеріал руйнується при напруженнях значно менших, ніж при статичних навантаженнях, і в цьому випадку напруження руйнування може бути нижчим не тільки за границю міцності, але і за границі текучості та пружності матеріалу.

Отже, границя міцності  $\sigma_b$  і границя текучості  $\sigma_T$  не можуть бути характеристиками міцності матеріалу при змінних напруженнях.

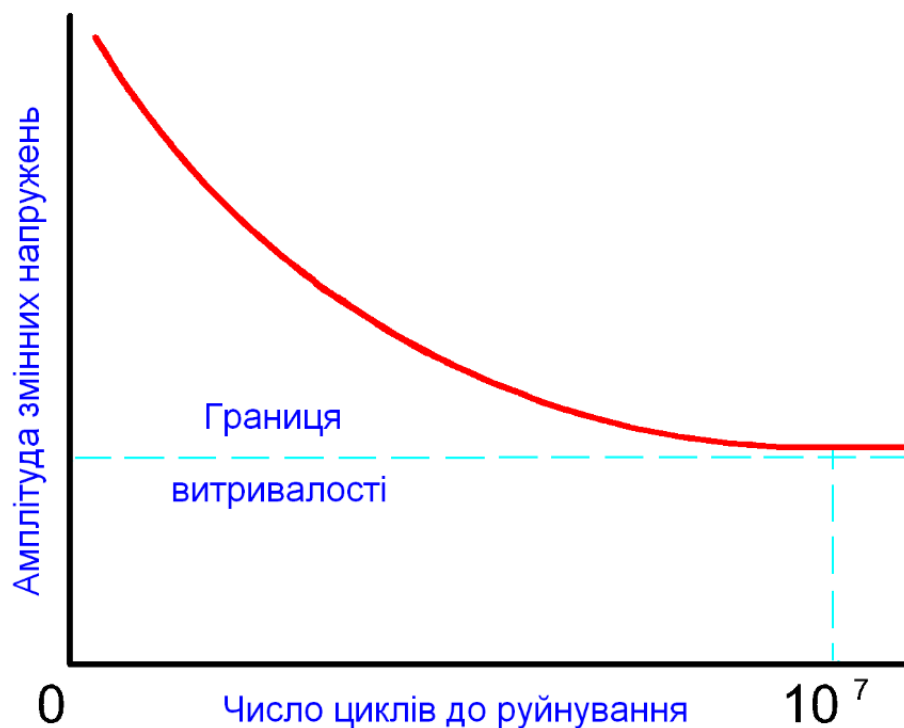


Рисунок 11.1 – Зв'язок амплітуди напружень і границі витривалості

При розрахунках на міцність в машинобудуванні використовується інша характеристика міцності матеріалу, а саме, границя втоми, або витривалості, яка визначається з випробувань матеріалу при змінних напруженнях.

Якщо рівень змінних напружень перевищує границю витривалості, то у матеріалі деталі відбувається процес поступового накопичення пошкоджень, який призводить до утворення тріщин, їх розвитку і в кінці кінців до руйнування деталі.

Цей процес називають втомою матеріалу, а відповідне руйнування – втомним.

Зовнішні ознаки втомного руйнування наступні: виникнення та поширення характерного виду тріщин в тих місцях, де є сліди від інструменту, а також в місцях стику різних перерізів. Процес відбувається в такій послідовності: спочатку в металі накопичуються незворотні зміни, які призводять до виникнення мікроскопічних тріщин, що з часом збільшуються і проникають в глибину тіла деталі, поки не настає момент крихкого руйнування.

Проблема попередження втомних руйнувань актуальна для всіх галузей машинобудування, особливо для тих, де аварії призводять до катастрофічних наслідків (авіація, залізничний, морський транспорт і т.ін).

### **11.2. Цикл напружень та його параметри**

За характером зміни у часі процеси навантажування поділяють на регулярні та нерегулярні (див. рис. 11.2).

Регулярним називається навантажування, яке характеризується періодичним законом змінювання навантажень з одним максимумом та одним мінімумом за один період при сталих параметрах циклу напружень протягом всього часу випробувань або експлуатації. Найбільше поширення має синусоїдальний цикл (див. рис. 11.3).

Всі інші види навантажувань, які не задовольняють цьому визначенню, називаються нерегулярними.

Відповідно до визначення, при регулярному навантажуванні змінні напруження  $\sigma$  мають циклічний характер. Тобто через деякий час  $T$ , що називається періодом, величина і знак напруження повторюються.

Сукупність послідовних значень напружень за один період їх зміни називається циклом зміни напружень.

До основних параметрів циклу відносяться:

*Частота циклів  $f$*  – відношення числа циклів до інтервалу часу їх дії.

*Період циклу  $T$*  – тривалість одного циклу напружень,  $T=1/f$ .

Максимальне напруження циклу  $\sigma_{\max}$  ( $\tau_{\max}$ ) – найбільше за алгебраїчною величиною напруження циклу.

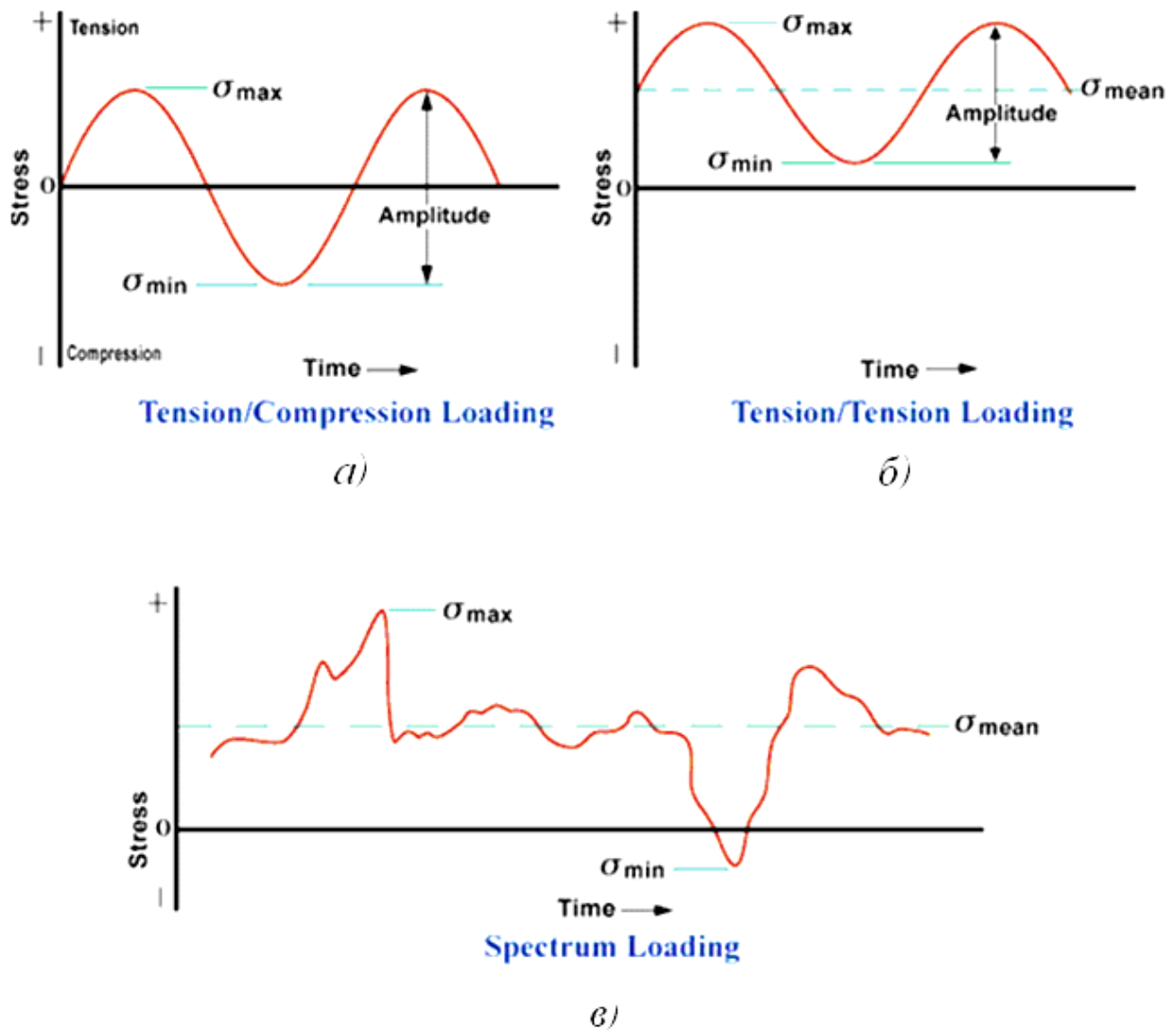


Рисунок 11.2 – Види циклічних навантажень за регулярністю:

a і б – регулярні; в – нерегулярне

Мінімальне напруження циклу  $\sigma_{\min}$  ( $\tau_{\min}$ ) – найменше за алгебраїчною величиною напруження циклу.

Середнє напруження циклу  $\sigma_m$  ( $\tau_m$ ) – стала (додатна або від'ємна) складова циклу напружень, яка дорівнює алгебраїчній напівсумі максимального і мінімального напруження:

$$\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}).$$

Амплітуда напружень циклу  $\sigma_a$  ( $\tau_a$ ) – найбільше числове додатне значення змінної складової циклу напружень, яка дорівнює алгебраїчній половині різниці максимального і мінімального напруження  $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ .

При циклічних навантаженнях за граничне напруження приймають границю витривалості відповідного циклу навантаження: симетричного –  $\sigma_{-1}$ , пульсуючого  $\sigma_0$ , асиметричного  $\sigma_r$ . Крім того асиметричні цикли навантаження характеризуються коефіцієнтом асиметрії, що дорівнює відношенню мінімального напруження до максимального  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ .

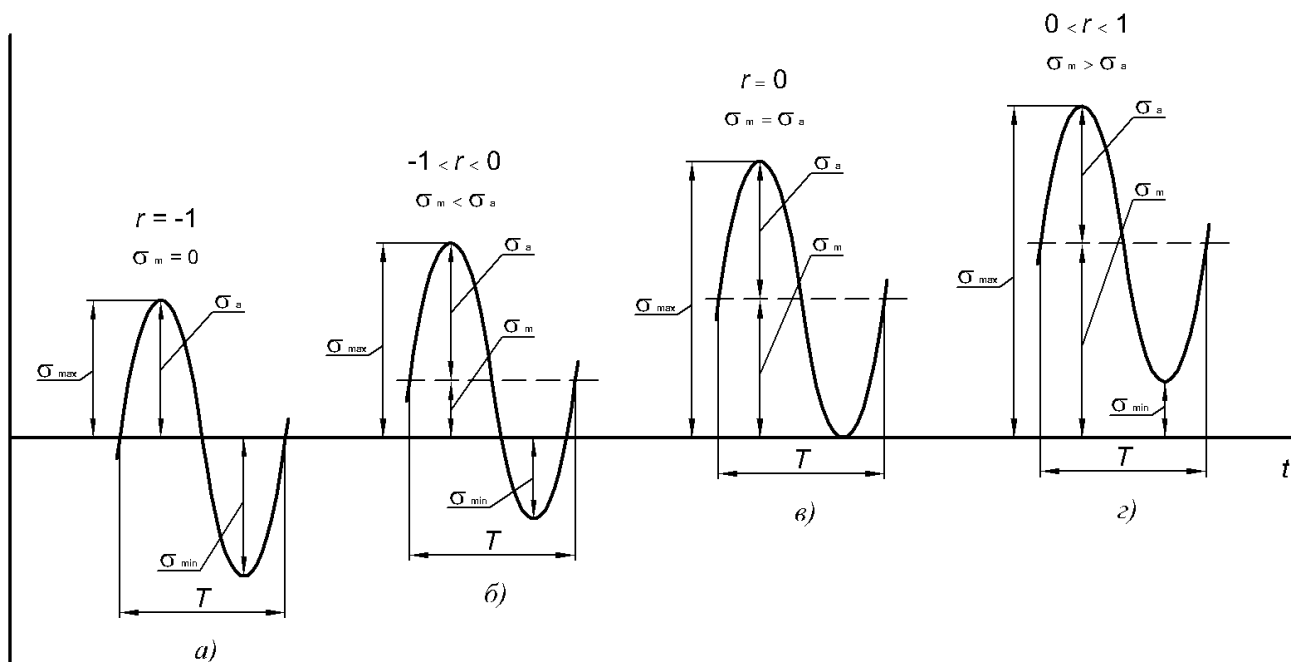


Рисунок 11.3 – Загальний вигляд синусоїдальних циклів:

- а) знакозмінний симетричний; б) знакозмінний асиметричний; в) пульсуючий;
- г) знакопостійний

Під границею витривалості при даному  $r$  розуміють те найбільше напруження  $\sigma_{\max}$ , яке може витримати метал без руйнування від втоми при необмеженому числі циклів навантаження.

Довговічність  $N$  – це число циклів напруження, при якому відбувається руйнування в заданих умовах випробувань.

Випробування на витривалість – це встановлення залежності  $\sigma_{\max}$  від певної довговічності.

Криві витривалості мають наступний вигляд

Границя витривалості практично не залежить від:

- закону зміни напружень на протязі одного циклу;
- частоти зміни циклів (до 1000 Гц).

На неї в основному впливають:

- вид напруженого стану;
- величина і знак максимального і мінімального навантажень;
- ступінь асиметрії циклу.

### 11.3. Діаграма граничних напружень

Вплив асиметрії циклу характеризується діаграмою граничних напружень (повною діаграмою витривалості), яка зображена на рис. 11.4.

На діаграмі:

- $OK$  – нульова лінія для амплітудних напружень;
- точка  $C$  відповідає границі міцності матеріалу;
- точка  $K$  відповідає границі текучості;
- криві  $AC$  і  $BC$  будуються за результатами експериментальних досліджень і відповідають зміні  $\sigma_{\max}$  і  $\sigma_{\min}$  напруження циклу витривалості, тобто є границями циклічної міцності.

Частина діаграми, що розміщена вище  $\sigma_T$  не має практичного значення, оскільки в цій зоні мають місце недопустимі пластичні деформації.

Зона обмежена лініями  $OADLKMEB$  – є областю поєднання безпечних значень змінних  $\sigma_a$  та постійних  $\sigma_m$  напружень асиметричного циклу.

Точки  $A$  і  $B$  відповідають границі витривалості при симетричному циклі, для якого:

$$\sigma_m = 0,$$

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min},$$

$$\sigma_r = \sigma_{\max} = \sigma_{-1}.$$

Точка  $D$  відповідає границі витривалості при пульсуючому циклі, для якого:

$$\sigma_{\min} = 0,$$

$$\sigma_a = \sigma_m = 0,5 \cdot \sigma_{\max},$$

$$\sigma_r = \sigma_{\max} = \sigma_0.$$

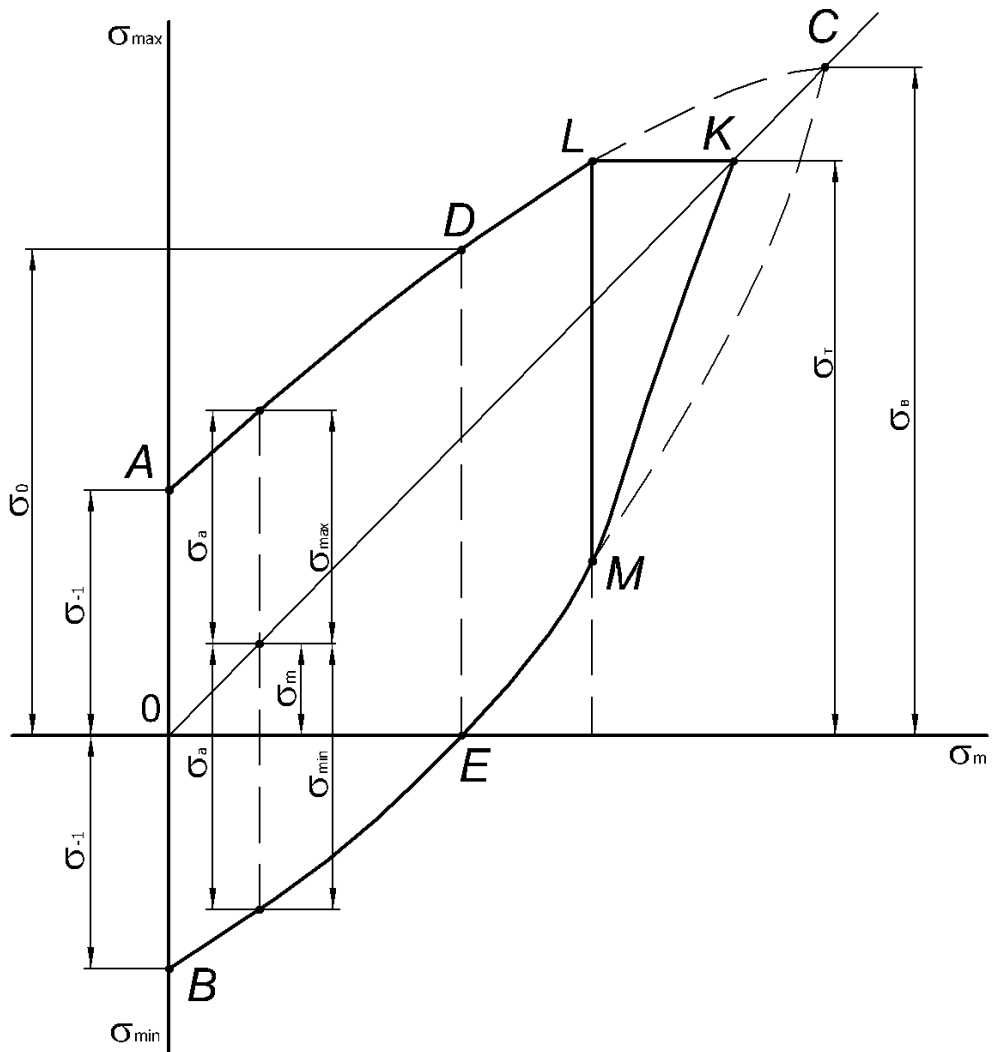


Рисунок 11.4 – Загальний вигляд діаграми граничних напружень

Точки  $L$  і  $M$  відповідають асиметричному знакозмінному розтягу.

Як видно з діаграми найменша границя витривалості має місце при симетричному циклі, а співвідношення між границями втоми при згині  $\sigma_{-1}$ , крученні  $\tau_{-1}$  та розтягу-стиску  $\sigma_{-1p}$  для гладких зразків мають наступний вигляд:

$$\sigma_{-1p} = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{-1};$$

$$\tau_{-1} = (0,57 \dots 0,62) \sigma_{-1}.$$

Зв'язок між границею втоми та границею міцності для гладких полірованих зразків діаметром 7...10 мм наступний:

- для сталі та чавуну  $\sigma_{-1} = 0,4\sigma_B$ ;
- для кольорових металів  $\sigma_{-1} = (0,25 \dots 0,5)\sigma_B$ .

#### **11.4. Вплив форми та розмірів деталей на втомну міцність**

Результати досліджень довели, що на втомну міцність деталей великий вплив мають їх форма та розміри.

Форма деталей обумовлює наявність концентраторів напружень, що негативно впливають на втомну міцність.

Чавун, нержавіючі сталі, м'які пластичні сталі, а також значна кількість кольорових металів та сплавів мають невелику чутливість до концентраторів напружень.

Найбільш чутливими є загартовані сталі, причому чим більша границя міцності, тим вище чутливість.

Із збільшенням абсолютних розмірів деталі втомна міцність знижується.

Втомна міцність знижується також при збільшенні забрудненості сталі неметалічними включеннями, нерівномірності розподілу легуючих елементів і збільшенні зерен металу, з появою тріщин, під час гартування, дефектів прокатування чи кування.

Але в більшості випадків руйнування від втоми є результатом дефектів обробки: неякісна механічна обробка, яка викликає появу тріщини, рваних місць, перервного наклепаного шару, шліфувальних відпалів, залишкових напружень розтягу і т.д.

#### **11.5. Вплив якості поверхні на втомну міцність деталей**

Якість поверхні є важливим фактором, який впливає на втомну міцність. Найбільший вплив мають такі параметри: радіус впадин нерівностей, найбільша висота, мікротвердість поверхневого шару, глибина наклепаного шару, залишкові напруження в поверхневому шарі.

Вид обробки впливає не тільки на шорсткість поверхні, але і на виникнення в поверхневому шарі залишкових зусиль розтягу чи стиску, які призводять до виникнення наклепаного шару.



Рівень границі втомної міцності в залежності від границі міцності матеріалу та видів обробки подано у таблиці 11.1.

Таблиця 11.1 – Рівень границі втомної міцності в залежності від границі міцності матеріалу та видів обробки

Вид обробки	$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$		
	470	930	1400
Тонке полірування	100 %	100 %	100 %
Грубе полірування	95 %	93 %	90 %
Тонке шліфування	93 %	90 %	88 %
Грубе шліфування	90 %	80 %	70 %
Фрезерування	70 %	50 %	35 %

## ТЕМА 12. ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ

### 12.1. Загальні положення

Основна мета випробування на надійність – визначити рівень надійності виробів і оцінити його числовими показниками.

В результаті випробувань виявляють слабкі місця виробу, розробляють заходи щодо покращення конструкції, визначають раціональну схему планових ремонтів і ТО, перевіряють розрахунки, які проведені під час проектування.

Проведення випробувань будь-якого, а особливо складного виробу, є складною інженерною задачею, оскільки пов'язано з великими затратами часу і ресурсів.

В результаті випробувань отримують відомості про характеристики надійності виробу даного типу з певним ступенем достовірності, а саме:

1. Закони розподілу термінів служби до відмови для кожного з вихідних параметрів виробу з урахуванням умов і режимів роботи. Ця характеристика є найбільш повною і дозволяє визначити всі необхідні показники надійності і в першу чергу ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ . Однак це потребує значної

кількості статистичного матеріалу, що реально можна реалізувати лише для простих виробів або взірців.

2. Випадок, коли визначені окремі параметри законів розподілу, або одержані дані, які неповно характеризують ці закони, є найбільш типовим результатом випробувань багатьох об'єктів. Наприклад, може бути визначена ймовірність безвідмовної роботи виробу на протязі заданого періоду часу, але залишається невідомою характеристика безвідмовності для більш тривалого періоду роботи виробу або закон розподілу термінів служби та його параметри визначені лише з певним ступенем достовірності. За цією обмеженою інформацією також треба робити висновок про рівень надійності виробу.

3. Складність і тривалість випробувань може призвести до неможливості оцінки зміни вихідних параметрів виробу в часі. В цьому випадку показником надійності може служити запас надійності по кожному з параметрів, який, хоча і не зв'язаний з часом, але дає певну інформацію про надійність виробу. Аналіз цих даних з використанням методів прогнозування може дати уяву про надійність виробу в цілому.

4. В багатьох випадках через складність задачі взагалі не можливо оцінити рівень надійності виробу в абсолютних значеннях, а є можливість лише визначити відносні показники стосовно прототипу або аналогічних виробів. Результати випробувань можуть дати відповідь, у скільки разів, наприклад, збільшиться безвідмовність або довговічність нового виробу, який працює в аналогічних умовах, що і прототип, не вирішуючи питання щодо дійсного рівня надійності виробу.

## **12.2. Класифікація видів і методів випробувань**

За призначенням випробування на надійність бувають *дослідницькими*, які проводять для визначення факторів, що впливають на надійність і *контрольними*, метою яких є оцінка рівня надійності даного виробу.

За місцем проведення випробування бувають стендовими, експлуатаційними і полігонними. *Стенові випробування* забезпечують постійне спостереження за процесом втрати машиною, вузлом чи спряженням

працездатності і дають можливість отримувати необхідні відомості про надійність і довговічність об'єкта випробувань. *Експлуатаційні випробування* проводяться в реальних умовах роботи машини і дають найбільш реальні показники надійності. *Полігонні випробування* проводять у найбільш важких умовах експлуатації на спеціально створеному фоні. Недоліком цих випробувань є не завжди досяжна тривалість випробувань, яка відповідала б нормальній експлуатації (автомобіль – 7 років, верстат – 10 років), а також той фактор, що результат випробувань характеризує параметри конкретного об'єкта і не дає уяви про дисперсію параметрів і про їх середнє значення.

Тому велике значення мають *прискорені випробування*, при яких необхідний обсяг інформації стосовно надійності одержують в більш стислий термін, ніж при нормальних умовах і режимах експлуатації.

### **12.3. Випробування матеріалів на стійкість**

Випробування стійкості матеріалів, тобто їх спроможність протистояти руйнуванню, зносу, корозії, кавітації та іншим процесам є базою для дослідження надійності тих виробів, де ці процеси відіграють основну роль у втраті машиною працездатності.

В результаті цих випробувань повинні бути отримані дані про швидкість протікання процесу при дії різноманітних факторів, або про критичні значення параметрів, при яких виникають небажані форми процесу руйнування.

Загальні вимоги, які висуваються до випробувань матеріалів на той чи інший вид руйнувань такі:

- випробування повинні проводитись в умовах, що якомога точніше моделюють умови експлуатації матеріалів в машинах чи вузлах, і відповідно відображати вид навантажень зразків, діючі зусилля, швидкості, температуру, умови змащування та ін.;
- конструкція випробувальної машини повинна забезпечувати весь необхідний діапазон умов випробувань;
- випробування повинні бути стандартними і забезпечувати співставність результатів, проведених різними дослідниками;

- умови і метод випробувань повинні забезпечити отримання характеристик з найменшим впливом конструктивних особливостей зразків, що дозволить використати результати даних випробувань для оцінки надійності різноманітних деталей, додатково враховуючи особливості їх конструктивних форм;
- необхідно прагнути до підвищення точності методів оцінки пошкодження, що дасть змогу скоротити тривалість випробувань.

#### 12.4. Метод послідовних випробувань

Застосування методу послідовних випробувань дає можливість перевірити, чи напрацювання виробу не нижче визначеного мінімуму при незначних затратах.

При плануванні випробувань приймається певний закон розподілу часу безвідмовної роботи. Якщо визначений один з показників надійності (наприклад  $T_{cp}$ ) і відоме нижнє нормативне значення  $T_n$ , то можна встановити мінімальну кількість спостережень, яка при певній довірчій ймовірності  $\alpha$  забезпечить напрацювання.

Якщо розподіл  $t_i$  підкоряється нормальному закону, то умова надійності виробу має вигляд

$$T_{cp} \geq T_n + T_\alpha \sigma / \sqrt{N} = A_1.$$

Умова браку

$$T_{cp} \leq T_n - T_\alpha \sigma / \sqrt{N} = A_2,$$

де  $T_\alpha$  – нормативний коефіцієнт Лапласа.

Продовження випробувань доцільне у випадку  $A_2 \leq T_{cp} \leq A_1$ .

Оскільки  $\sigma = vT_{cp}$ , для кондиційних виробів повинні справджуватись нерівності

$$T_{cp} \geq \frac{T_n \sqrt{N}}{\sqrt{N} - T_\alpha v};$$

$$N \geq \left( \frac{T_\alpha T_{cp} v}{T_{cp} - T_n} \right)^2.$$

А для бракованих

$$T_{cp} \leq \frac{T_n \sqrt{N}}{\sqrt{N} - T_\alpha \nu};$$
$$N \leq \left( \frac{T_\alpha T_{cp} \nu}{T_{cp} - T_n} \right)^2 .$$

### 12.5. Контрольна обкатка об'єктів

Для перевірки надійності об'єктів виробництва та ремонту робиться обкатка, призначення якої визначення дефектів деталей та складання в цілому.

Оптимальну тривалість обкатки можна визначити за методикою професора Аніловича.

Якщо відома кількість  $N$  об'єктів, та час відмови кожного з них  $t_i$ , то емпірична функція параметру потоку відмов:

$$\omega(t_i) = \frac{\Gamma_i}{N \cdot \Delta t},$$

де  $\Gamma_i$  – кількість відмов за час  $\Delta t$ .

При достатньо великому  $N$

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \cdot e^{-\alpha t},$$

де  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  та  $\alpha$  – параметри, що шукають методом найменших квадратів.

Обкатку можна вважати закінченою, коли

$$\frac{\omega(t_{об}) - \omega_0}{\omega_0} \leq k ,$$

при цьому  $k = 0,03 \dots 0,05$ .

Звідки

$$t_{об} = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{k\omega_0}{\omega_1} .$$

При відсутності навантаження  $\omega_0 = 0$

$$\omega(t) = \omega_1 \cdot e^{-\alpha t},$$

тоді при умові  $\omega(t_{об}) = k\omega$ ,

$$t_{об} = -\frac{1}{\alpha} \ln k = \frac{3}{\alpha}.$$

## 12.6. Випробування на надійність складних систем

Специфікою випробувань на надійність складних систем є те, що вони, як правило, досить дорогі і для випробувань можна виділити один, два взірці, кожен з яких має індивідуальні особливості. Крім того умови експлуатації і виконувани функції досить різні. В цьому випадку важко одержати статистичні дані про надійність. Це викликає необхідність застосовувати ймовірнісні характеристики для оцінки працездатності машини.

Для цього застосовують різноманітні методичні підходи, одним з яких є вибір комплексного показника ефективності, що характеризує працездатність всієї системи.

Основні принципи, які закладаються в основу методик випробувань такі

- випробування повинні поєднуватись з прогнозуванням і розрахунком надійності;
- повинна використовуватись вся інформація із сфери експлуатації та ремонту, а також результати випробувань на надійність окремих елементів і матеріалів;
- випробування на надійність може бути базою для здійснення моделювання поведінки складної системи в умовах експлуатації;
- для складних систем допустиме дослідження не всієї області існування параметрів, а лише її меж, які визначають ступінь віддаленості від граничного стану;
- в ряді випадків допустиме отримання лише окремих показників надійності або порівняльних оцінок.

## 12.7. Використання методу прогнозування та моделювання

Моделювання складних систем має значну перспективу для оцінки надійності машин і комплексів.

Модель повинна відображати реальні фізичні процеси, що протікають у виробі при його експлуатації, імітувати їх розвиток. Для побудови моделі

необхідно мати інформацію з випробувань об'єкта або його елементів з подальшим уточненням її виду і самих результатів моделювання.

При моделюванні використовуються математичні, фізичні, комбіновані та інші моделі. Математична модель встановлює взаємозв'язок між входом системи (режими, умови експлуатації, зовнішні впливи) та її виходом (параметри, що характеризують працездатність системи).

В цьому випадку фізична модель виключається із сфери досліджень і служить лише джерелом інформації для визначення параметрів моделі і уточнення її виду, а саме моделювання здійснюється за допомогою ЕОМ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ремонт машин / Сидашенко О.І., Поліський А.Я., Науменко О.А. та ін./ За ред. О.І. Сідашенка та О.А. Науменка. – Харків: ХНТУСГ, 2014. – 739.
2. Надійність гідромашин і гідроприводів: конспект лекцій / укладач В.Ф. Герман. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 84 с.
3. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Нормування показників надійності технічних засобів. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2010. - 129 с.
4. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин: Підручник. – К.: Либідь, 2003. – 424 с.
5. Дмитриченко М.Ф. Триботехніка та основи надійності машин./ М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик. -К.: Інформавтодор, 2006. – 216с.
6. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: навч. посібник / Є.Ю. Формальчик, М. С. Оліскевич, О. Л., Мاستикаш, Р. А. Пельо. – Львів: Афіша, 2004. – 492 с.
7. Залужний А.М. Надійність та діагностика технічних систем: Навчальний посібник./ А.М. Залужний. – Житомир. – ЖІТІ, 2002. – 356с.
8. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
9. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення.
10. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги.
11. ДСТУ 2863-94 Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги.
12. ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання. Контроль надійності. Основні положення.
13. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.