

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІНИ
«НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»

Одеса – 2022

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІНИ
«НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 152 ТА 131
ПЕРШОГО БАКАЛАВРСЬКОГО ОСВІТНЬОГО РІВНЯ

Затверджено на засіданні
кафедри цифрових
технологій в інжинірингу
Протокол № 3 від 15 грудня
2021 року

Одеса – 2022

Конспект лекцій з дисципліни «Надійність технічних систем» для студентів спеціальності 152 та 131 першого бакалаврського освітнього рівня / Укл. Г.О. Оборський, І.В. Прокопович. – Одеса: Державний університет «Одеська політехніка», 2022. – 47 с.

Укладач. Г.О. Оборський, д-р. техн. наук, проф. ;
 І.В. Прокопович, д-р. техн. наук, проф.

ЗМІСТ

Лекція 1. Основні поняття і визначення теорії надійності.....	5
1.1. Надійність та її складові.....	5
1.2. Основні терміни та визначення в області надійності.....	6
1.3. Основні задачі теорії надійності.....	8
Лекція 2. Системи та елементи	10
2.1. З'єднання елементів у системі.....	10
2.2. Резервування. Загальні поняття.....	11
2.3. Класифікація відмов та їх причини.....	13
Лекція 3. Основні показники надійності.....	15
Лекція 4. Моделювання та розрахунок надійності. Закони розподілу часу відмов.....	19
4.1. Експоненціальний розподіл (показовий розподіл).....	19
4.2. Нормальний розподіл	19
4.3. Логарифмічно-нормальний розподіл	20
4.4. Розподіл Вейбулла	21
4.5. Гамма-розподіл	22
4.6. Розподіл Релея.....	22
4.7. Моделювання надійності на основі фізики відмов.....	23
Лекція 5. Моделювання надійності випадкових процесів.....	26
5.1. Моделювання надійності випадкових процесів.....	26
5.2. Основні відомості з теорії випадкових функцій.....	27
Лекція 6. Моделювання та розрахунок надійності випадкових процесів.....	30
Лекція 7. Надійність складних технічних систем	33
7.1. Структурні моделі надійності систем	33
7.2. Надійність технологічних систем.....	34
7.3. Аналіз та прогнозування надійності ТП.....	35
Лекція 8. Показники надійності технічних систем	37
8.1. Технологічні системи	37
8.2. Моделювання та дослідження надійності технологічних процесів.....	38
Лекція 9. Надійності технологічних процесів	42
9.1. Визначення надійності ТП за структурними моделями.....	42
9.2. Визначення надійності ТП обробці партії деталей.....	43
Питання для самоконтролю.....	46
Література.....	47

Лекція 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

1.1. Надійність та її складові

Надійність – властивість об'єкта зберігати в часі в встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування [ГОСТ 27.002-83] – це якість розгорнуте в часі.

Поняття «надійність» давно і міцно увійшло в наше життя. Наприклад – «він надійний партнер (один) – ніколи не відмовить» – характеризує якості людини. Нас будуть цікавити так само надійність явищ, пристроїв, приладів, машин, різних процесів.

Однак, незважаючи на широку поширеність – теорія надійності з'явилося порівняно недавно.

Необхідність кількості оцінки поняття «надійність», її прогноз і управління було продиктовано вимогами військового часу. У 40-х роках ВМС, ВМФ і СВ США заснували комітети для дослідження надійності військової техніки, в 1952р. - міністерство оборони США скоординувати їх діяльність і організувало Консультативну групу з питань надійності. в ці ж роки почався бурхливий розвиток теорії надійності в нашій країні - під керівництвом Академіка АН України Гнеденко Б.В. Сьогодні ми вибрали надійні літаки, автомобілі, телевізори.

Для забезпечення надійності виробу і об'єкту представленні такі вимоги:

- а) виробу, не повинні виходити з робочого стану у заданий період функціонування;
- б) за умови виконання необхідних налаштувань, профілактичних ремонтів і заміन окремих деталей вони повинні бути здатні тривалий час виконувати покладені на них завдання;
- в) виконання необхідних робіт по підналагодженню ремонту не повинно викликати жодних труднощів;
- г) в умовах тимчасової відсутності функціонування (перевезення, транспортування, зберігання) – виробу не повинні втрачати свій рівень якості.

Вимога, сформульоване в пункті «а», отримало найменування безвідмовності. Воно абсолютно необхідне кожному виробу. Виріб, яке не здатне успішно пропрацювати протягом заданого часу, не може вважатися надійним.

Якщо літак не може без відмов в обладнанні пролетіти від пункту «а» до пункту «в», то його надійність незадовільна і найкраще послугами такого літака не користуватися. Якщо апарат «штучне серце» не в змозі підтримати заданий режим у продовж всієї операції на серці, то його використання може завдати непоправної шкоди пацієнтові.

Властивість безвідмовності абсолютно необхідно як виробам разового використання, так і виробам, які повинні багаторазово виконувати подібні операції.

Властивість, описане у вимозі «б», носить назву довговічності. Воно необхідне переважній більшості виробів техніки, оскільки немає можливості постійно замінювати виробу на нові. Будь-які виробу повинні економічно виправдовувати себе, а для цього потрібно, щоб вони досить довго пропрацювали. Генератор електроенергії, щоб не тільки окупити свою вартість, а й дати відомий прибуток, зобов'язаний пропрацювати 25...30 років. Автомашину, щоб її придбання було виправдано економічно, також повинна пропрацювати кілька років. Апарат «штучні нирки» клініка не може купувати для кожного хворого, він повинен виправдовувати себе тривалою безвідмовною роботою і обслужити велику кількість пацієнтів.

Довговічність виробу складається не тільки з періодів його роботи, коли зберігається його безвідмовність, закладена ще в період виготовлення, але і з тієї його здатності виконувати свої функції, які воно отримує від періодичних ремонтів, підналагодження,

змін зношених вузлів і деталей. Так, якщо вважається, що трактор від моменту придбання до моменту списання повинен пропрацювати 12 років, то це означає, що в період експлуатації, потребує профілактичних оглядів і ремонтів, заміні деталей, ремонті двигунів, зміні покришок, шасі та ін. Зрозуміло, що збільшення довговічності технічної системи загалом не дається даром. На це потрібно витратити робочий час, матеріали і засоби. Найчастіше трапляється так, що за період експлуатації на ремонті і різного роду дії з підтримки працездатності технічного виробу доводиться витратити кошти, в кілька разів перевищує його початкову вартість. Однак при цьому забезпечується його тривала працездатність, що досягає 12...15 років. За цей термін він встигає сторицею відплатити витрати, пов'язані з його експлуатацією.

Слід зауважити, що витрати на ремонт і взагалі на експлуатацію сильно залежать від конструктивних рішень і не меншою мірою від кваліфікації обслуговуючого персоналу. Це, здавалося б, тривіальне зауваження далеко не завжди береться до уваги і нерідко конструктори передають в виробництво невідпрацьовані моделі, експлуатація яких лягає важким тягарем на плечі споживача. Точно така ж погана підготовка експлуатування і його недбалість в процесі роботи приводять до передчасного зносу машини і надмірного збільшення витрат на ремонт.

Третя вимога, яке необхідно пред'являти до технічних виробам, щоб вони могли вважатися надійними, носить назву ремонтпридатність, але цей термін відображає сенс поняття гірше.

Йдеться про те, щоб налагодження і ремонт виробу були здійсненні в короткі терміни і не вимагали повного його розбирання. Уявімо собі, що буде, якщо для під'єднання дроту до системи запалювання двигуну автосамоскиду необхідно відрізати капот (інакше ця проста операція виявиться нездійсненною). Якщо такий стан нетерпимо в звичайних умовах роботи, то воно може привести до визначити неможливо труднощами при експлуатації машини в умовах крайньої півночі або інших складних умовах. Проте подібні приклади на практиці трапляються, і наведена нами зараз ситуація нав'язана реальним досвідом. Продумана конструкція машини обов'язково повинна враховувати умови експлуатації, а значить, і ремонту (принаймні дрібного) на місці, без відправки в ремонт майстерні.

Ми вже згадали, що три групи вимог охоплюють практично всі можливі ситуації, які можуть зустрітися при використанні виробів техніки. Дійсно, на перевезення і зберігання можна дивитися як на процес експлуатації в певних умовах. Втрата точності обробки прецизійним верстатом означає не що інше, як втрату їм властивості безвідмовності. Старіння матеріалів, знесення поверхонь, що труться деталі в машинах – все це може розглядатися як зниження безвідмовності виробу.

Однак існують певні класи виробів, для яких збереження рівня якості без їх експлуатації (продукти харчування, батареї) цього показника для приладів (за даними США – 50 % радіоелектронним обладнанням і запчастин вибило з ладу в процесі зберігання – під час II світової війни).

Четверта вимога, яким повинні відповідати надійні виробу – називається збереженість. Надійність – це складна властивість, яка в залежності від призначення виробу (об'єкта) і умов його застосування полягає в поєднанні властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і зберігання.

1.2. Основні терміни та визначення в області надійності

1. *Безвідмовність* – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або деякого напрацювання.

2. *Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

3. *Ремонтопридатність* – властивість об'єкта, полягає в пристосування і виявленні причин виникнення відмов, пошкоджень та підтриманню і відновленню працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту.

4. *Збереженість* – властивість об'єкта зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності протягом і після зберігання ними транспортування.

5. *Працездатний стан* – стан об'єкту, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати документації.

Визначення працездатного стану – ключовий момент в оцінці надійності, складність тут полягає в тому, що незліченна різноманіття виробів і об'єктів характеризує така ж кількість параметрів, що визначаються працездатний стан. Так, наприклад, приведена класифікація складних технічних систем по параметрам їх працездатності.

6. *Передзмінний стан* – стан об'єкта, при якому його подальше застосування за призначенням недопустимо або недоцільно, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

7. *Відмова* – подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

8. *Критерій відмови* – ознака або сукупність ознак непрацездатного стану об'єкта, встановлені в нормативно-технічній документації.

9. *Відновлюваний об'єкт* – об'єкт, для якого проведення відновлення працездатного стану передбачено нормативно-технічної документації. (телевізор, автомобіль, літак)

10. *Невідновлювальних об'єкт* – об'єкт для якого проведення відновлення працездатного стану не передбачено нормативно-технічної документації. (батарея, лампочка)

11. *Напрацювання* – тривалість або обсяг роботи об'єкта.

12. *Напрацювання до відмови* – напрацювання об'єкта від початку його експлуатації до виникнення першої відмови.

13. *Напрацювання між відмовами* – напрацювання об'єкта від закінчення відновлення його працездатного стану після відмови до виникнення наступної відмови.

14. *Термін служби* – тривалість від початку експлуатації об'єкта до переходу в передзмінний стан.

15. *Термін зберігання* – тривалість зберігання або транспортування об'єкта, протягом і після якої зберігаються значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності.

16. *Пошкодження* – подія, що полягають в порушенні справного стану об'єкта при збереженні його працездатності.

17. *Справний стан* – стан об'єкта, при якому він відповідає затребуваність нормативно-технічної документації.

Період об'єкта з справного стані в несправне пошкодження (подряпини на капоті), період з працездатного стану в непрацездатний через відмову (засмітився карбюратор).

Працездатне об'єкт на відміну від справного повинен задовольняти лише тим вимогам, виконання яких забезпечує застосуванні його за призначенням. Перехід об'єкта в граничний стан тягне за собою тимчасове або остаточне припинення застосування об'єкта за призначенням. Для не ремонтваних об'єктів має місце граничний стан двох видів: 1) перший вид збігається з непрацездатним станом. 2) другий вид – починаючи з якого часу подальше використання поки ще працездатного об'єкта згідно з визначеними критеріями - неприпустимо (перехід не ремонтваних в граничний стан другого виду відбувається раніше виникнення відмови). Для ремонтваних об'єктів – є три види граничних станів. Для двох видів – потрібно відправка в капітальний і середній ремонт (тобто тимчасове припинення застосування об'єкта за призначенням), третій вид граничного стану - припускає списання об'єкта.

1.3. Основні задачі теорії надійності

Основні задачі теорії надійності. Подивимося тепер, які ж завдання повинна вирішувати теорія надійності. Очевидно, що перша з них полягає, з одного боку, у визначенні надійності технічної системи за відомими надійність її компонентів і, з іншого боку, в стані різних варіантів конструкції за ступенем їх надійності.

Здавалося б, ці завдання не повинні представляти великих труднощів. Однак насправді це не так, оскільки компоненти системи між собою пов'язані безліччю зв'язків, вузлів, і елементи, що знаходяться при різних навантаженнях.

Більш того, робота одних частин системи може призводити до виникнення додаткових впливів (магнітних, вібраційних, електричних, радіаційних та інших) на них і на інші частини. Необхідно враховувати зв'язок, ступеня впливу яких невідомі.

В силу сказаного будь-який розрахунок надійності слід розглядати як деякі наближення до дійсності. У міру накопичення досвіду точність розрахунків поступово збільшується.

Зокрема, з тієї причини, що вдається уточнити цікавлять нас зв'язку, виявити реальні навантаження на різні вузли. Пізніше, у другій частині брошури, буде дано деякі уявлення про характер розрахунків надійності в ряді не дуже складних випадків. Безсумнівно, що іншим найважливішим завданням теорії надійності слід вважати розробку планів випробувань продукції на надійність. Випробування потрібно проводити при оцінці якості вихідних матеріалів і напівфабрикатів, при виготовленій продукції, для визначення впливу тривалого зберігання і транспортування.

Існує також ще один тип випробувань, який представляє свої специфічні труднощі. Ми маємо на увазі випробування дослідних зразків. Основні труднощі при цьому полягають у тому, що на цьому етапі за результатами випробувань лише двох-трьох примірників потрібно дати конструкції путівку в життя або ж відправити її на доопрацювання, а то і зовсім відкинути як невдалу.

Відповідальність на випробування при цьому лягає дуже велика, тому вони повинні бути ретельно продумані в усіх відношеннях. Є ще одна складність при випробуванні дослідних зразків – це визначення тривалості випробувань.

Як правило, терміни здачі проекту технічної системи стиснуті і на випробування залишаються буквально лічені години або дні, в той час як конструкція повинна бути розрахована на тривалий термін експлуатації.

Питання випробування вихідних матеріалів і напівфабрикатів не відрізняються від тих, які доводиться вирішувати при приймальному контролі готової продукції. Тут діють добре розроблені правила статичного приймального контролю, виведені в природному припущенні, що виробничий процес стабільний і не схильний до різких коливань. Використовуваний при цьому математичний апарат зводиться до елементів теорії ймовірностей і математичної статистики. Ця теорія добре розроблена і доведена до чітко сформульованих правил практичного використання. У серії «Математика, кібернетика» на цю тему вже була видана брошура.

Приймальні випробувань готової продукції давно цікавлять виробників. Тут можливі, як і при будь-якому приймальному випробуванні, помилки двох типів: по-перше, можна забракувати продукцію придатну, а по-друге, прийняти як придатну продукцію недоброякісну. В першому випадку придатні вироби не будуть використані і виробник знає необґрунтованих збитків. У другому – буде експлуатувати недоброякісна продукція і стане виходити з ладу передчасно, завдаючи шкоди споживачам.

Зрозуміло, що небажані помилки як першого, так і другого типу. На жаль, абсолютно позбутися від них неможливо, можна тільки домагатися зменшення шкоди, що завдається ними.

Коли мова йде про приймання продукції масового виробництва, в якому щомісяця виготовляються десятки тисяч, а то і мільйони примірників певного типу виробів, часто

немає можливості суцільного контролю всієї виготовленої продукції. Тут, однак, слід мати на увазі, що контроль може приводити до псування продукції.

Так, перевірка якості фотопаперу або фотоплівки веде до безповоротної втрати ними своїх робочих властивостей і до непридатності для подальшого використання. З цієї причини доводиться випробовувати лише невелику частку всієї партії продукції і на базі результатів їх випробувань судити про якість всієї партії.

2.1. З'єднання елементів у системі

Система – сукупність об'єктів (пристроїв), призначених для виконання певної функції.

З'єднання окремих виробів (об'єктів) в систему можливо тільки, якщо вони виступають як єдине ціле і мають спільну мету функціонування, а розподіл системи на окремі елементи – умовно, бо кожна система може входити як складовий елемент більш складної системи, а окремі елементи системи, в свою чергу, можна розглядати, як складні системи.

Системи можна розділити на однофункціональні і багатофункціональні. Системний підхід в теорії надійності є досить ефективним, тому що надійність системи покладається не тільки від того з скількох елементів вона складається, але і від надійності окремих елементів, а також які чином ці елементи обладнані в систему.

З'єднання елементів називаються послідовними, якщо відмова бодай одного елемента призводить до відмови всієї системи (рис. 2.1).

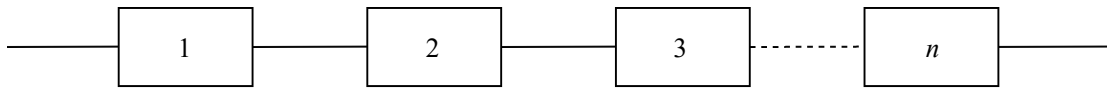


Рис. 2.1. Послідовне з'єднання елементів у системі

Система працездатна тоді і тільки тоді, коли працездатні всі її елементи.

Умова працездатності системи:

$$A_c = \bigcap_{k=1}^n A_k . \quad (2.1)$$

З'єднання елементів називають паралельним, якщо відмова системи відбувається тоді і тільки тоді, коли відмовлять всі елементи системи, тобто, система працездатна, якщо працездатний хоча б один елемент (рис. 2.2).

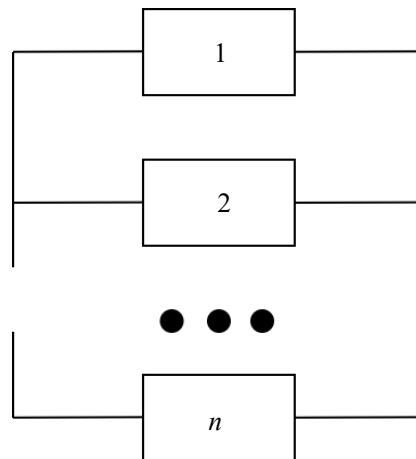


Рис. 2.2. Паралельне з'єднання елементів у системі

Умова працездатності системи:

$$A = \bigcup_{k=1}^n A_k . \quad (2.2)$$

Система може складатися з різного числа паралельно-послідовних елементів, а також мати більш складну структуру типу зірочка і місткова, такий формальний опис структури широко поширюється на електроніці, електричні і гідравлічні системи та пристрої, проте опис тих системах, де чітко прослідковується поєднання елементів різних типів з допомогою не радіаційних структурних схем не завжди можливо.

2.2. Резервування. Загальні поняття

Паралельні елементи в системі є надлишковими. Однак система володіє надмірністю по відношенню до системи з мінімальною структурою, необхідна для виконання завдання буде більш надійною.

Резервуванням – називають метод підвищення надійності системи шляхом введення надлишкових (резервних) елементів з метою збереження її працездатного стану при відмові одного з декількох елементів.

Елементи, які входять в систему поділяють:

1. *Основний елемент* – елемент структури, необхідний для виконання системою необхідної функції.

2. *Резервний елемент* – елемент структури, призначений для виконання функції основного елемента в разі відмови.

Класифікація видів резервування і резервних елементів:

1. *Постійне резервування* – здійснюється без перебудови структури системи при виникненні відмови. У цьому випадку основні та резервні елементи знаходяться в однакових умовах (робочому режимі) і одночасно виконують одні і ті ж функції (рис. 2.3).



Рис. 2.3. З'єднання елементів системи при постійному резервуванні

2. *Резервування заміщенням* – динамічний резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови першого за допомогою перемикача. При заміщенні працездатність системи буде залежати також від надійності перемикача (рис. 2.4).

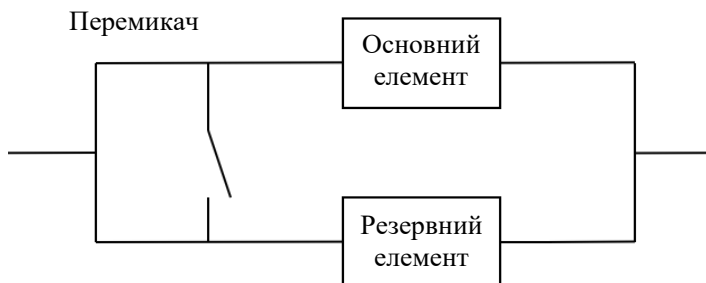


Рис. 2.4. З'єднання елементів системи при резервуванні заміщенням

3. *Загальне резервування* – резервованій об'єкт є системою в цілому.
а) загально-постійне резервування (рис. 2.5);

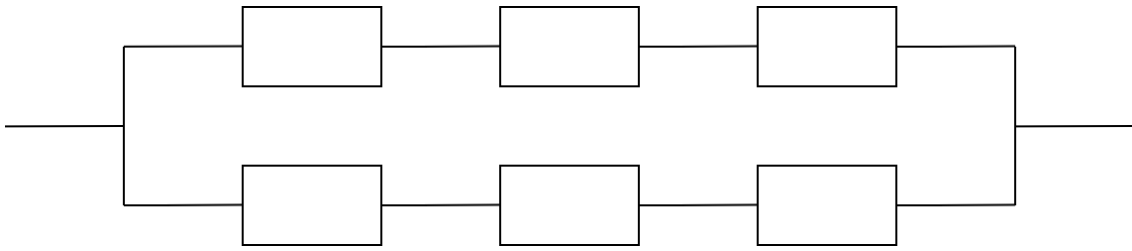


Рис. 2.5. З'єднання елементів системи при загально-постійному резервуванні

б) загальне резервування заміщенням (рис. 2.6).

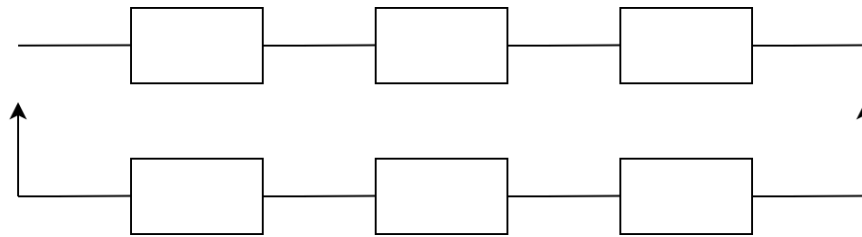


Рис. 2.6. З'єднання елементів системи при загальному резервуванні заміщенням

4. *Роздільне резервування* – резервування здійснюється поелементно:

а) роздільно-постійне резервування (рис. 2.7);

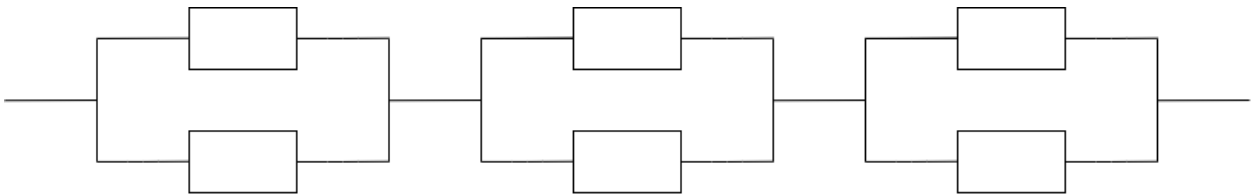


Рис. 2.7. З'єднання елементів системи при роздільно-постійному резервуванні

б) роздільне резервування з заміщенням (рис. 2.8).

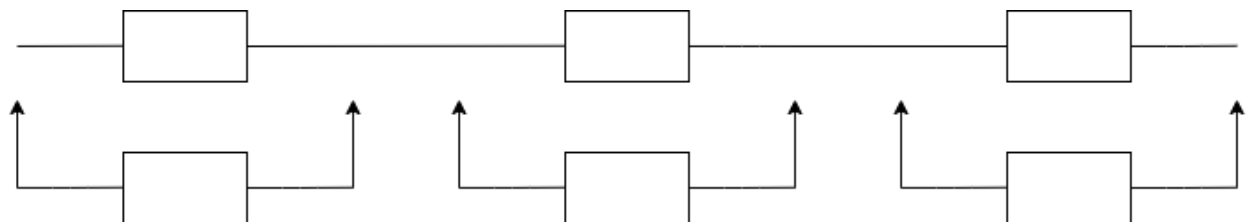


Рис. 2.8. З'єднання елементів системи при роздільному резервуванні заміщенням

5. *Навантажений резерв* – резервні елементи знаходяться в робочому режимі, в яких знаходиться основний елемент.

6. *Ненавантажений резерв* – резервні елементи не працюють до початку виконання або функцій основного елемента після відмови.

7. *Полегшений резерв* – резервні елементи працюють в менш навантаженому режимі, ніж основний елемент.

Для здійснення розрахунків надійності системи з різними видами резервування необхідно визначати стислість резервування, яка рівна відношенню резервних елементів до числа основних елементів (рис. 2.9).

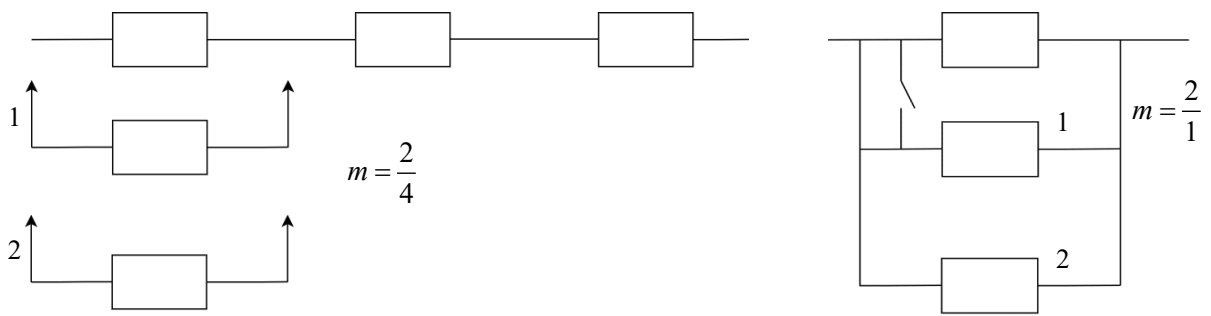


Рис. 2.9. Схеми для визначення стислості резервування

2.3. Класифікація відмов та їх причини

1. За характером виникнення та перебігу процесів, що приводять до відмови, існують:

- поступові(зносіві)відмови , які виникають внаслідок перебігу того чи іншого процесу старіння, що погіршую початкові параметри виробу. Основною ознакою поступової відмови є те, що імовірність її виникнення упродовж заданого періоду часу залежить від тривалої попередньої роботи виробу (системи). До цього виду належить більшість відмов машин. Вони зв'язані з процесом зносу, корозії , втомленості та повзучості матеріалів;
- раптові відмови, що виникають внаслідок сполучення несприятливих факторів та випадкових зовнішніх впливів , які перевищують можливості системи до їх сприйняття. Відмови виникають через деякий проміжок часу , який є випадковою величиною. Основною виникнення від тривалості попередньої роботи системи. Приклад такої відмови – поломка деталей через неправильне експлуатування машин в цілому.

2. За наслідками відмови поділяють на такі:

- функціональні, внаслідок яких виріб не може виконувати свої функції;
- параметричні, які проводять до виходу параметрів виробу за допустимі границі при збереженні загального функціонування системи. До таких відмов належать порушення точності виготовлення виробів на технологічному устаткуванні, падіння ККД машин та механізмів тощо.

3. За характером усунення розрізняють:

- остаточні(стійкі) відмови, що є наслідком незворотних процесів у деталей та матеріалах. При остаточних відмовах для поновлення працездатності об'єкта слід проводити ремонт;
- переміжні відмови – наслідок зворотних процесів, що викликають випадкові зміни режимів роботи та параметрів виробу. При поверненні режимів роботи та параметрів у допустимі границі об'єкт без стороннього втручання повертається до працездатного стану.

4. За зв'язками з іншими відмовами:

- первинні, що виникають з будь-яких причин, крім дії іншої відмови;
- вторинні, що виникають тільки внаслідок іншої відмови.

5. За місцем їхнього виникнення:

- конструктивні відмови – виникають як наслідок недосконалості конструкції;
- технологічні відмови – виникають через порушення прийнятої технології виготовлення системи;
- експлуатаційні відмови – виникають при порушенні правил експлуатації.

6. Відмови поділяють в залежності від наслідків їх виникнення.

З точки зору забезпечення безвідмовності (за наслідками відмов), технічні системи поділяють:

1. Системи, відмова яких приводить до аварії, катастрофи, невиконання відповідального завдання (літальні апарати, підйомно-транспортні машини, військова техніка тощо). Показники безвідмовності таких систем мають бути близькими до одиниці.

2. Системи, відмова яких приводить до екологічного збитку. Це технологічне устаткування, сільськогосподарські та побутові машини.

3. Системи, відмова яких викликає лише додаткові затрати на ремонт.

Забезпечення надійності складних технічних систем є актуальною задачею, особливо в період ринкових змін в економіці. Потреба особливої уваги до питань надійності зумовлена такими факторами:

1. Зміни в технології відбуваються так швидко, що часто не вистачає часу на опрацювання конструкції нового технологічного устаткування, особливо якщо мова йде про складні технічні системи.

2. Недостатньо створити діючу конструкцію технічної системи, остання повинна оптимізуватися при обмеженнях щодо вартості, надійності, розмірів тощо

3. Вагомого значення в наш час набуває надійність систем, що працюють у несприятливих умовах, аварії яких пов'язані з небезпекою для навколишнього середовища та життя людей.

При цьому причини відмов механічних систем, на відмінну від електронних та електричних, більш численні й різноманітні за своїм характером. До основних видів відмов технічних систем та технічного устаткування належать відмови внаслідок втомленості, течі, зносу, теплового навантаження, повзучості матеріалу, ударного навантаження, корозії, браку мастила, пружної деформації, поверхневої втомленості, викришування, розшарування, вилучення тощо.

Деякі з цих видів відмов характеризуються такими особливостями:

– відмови внаслідок течі та порушення режиму течії зв'язані з устаткуванням, у якому відбувається переміщення рідини;

– окремими видами відмов елементів конструкції є руйнування та надмірний згин;

– для термодинамічних систем характерні надмірне нагрівання та зниження ККД;

– заїдання підшипників і зниження точності стосовно переміщення спостерігають у кінетичних системах;

– призводять до відмов також неправильно вибраний матеріал, конструкція елементів або режим функціонування системи взагалі.

На різних етапах створення й експлуатації складних технічних систем дослідники володіють різним об'ємом інформації про проєктований (виготовлений) виріб, що диктує необхідність застосування різних методів оцінки та забезпечення надійності.

Лекція 3. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

Для оцінки надійності технічних систем і порівняння досягнутої надійності в різних конструкціях необхідно виробити кількісні показники, які дозволяти б з'ясувати, які безвідмовність, довговічність і ремонтпридатності даної групи виробів або даної конструкції і збереженість.

Безвідмовність прийнято оцінювати вірогідністю того, що виріб пропрацює заданий проміжок часу t без збоїв і без необхідності проведення ремонту, заміни вузлів і елементів. Це центральна числова характеристика надійності виробу, оскільки безвідмовність необхідна для будь-яких систем – одноразової дії і тривалої експлуатації. Хоча пусковий пристрій двигуна космічної станції має працювати дуже короткий термін, без його бездоганного функціонування станція не зможе виконати своє завдання. Якщо виріб тривалого користування через короткі проміжки часу потребує дрібного або навіть найменшого ремонту і підналагоджування, то такий виріб не може вважатися надійним. Якщо, скажімо, через кожні 5...10 хвилин у бавовнозбирального комбайну потрібно прочищати пристрій для захоплення коробочок, то збір бавовни перетвориться на муку.

Показники безвідмовності

Кількісно безвідмовність систем визначають декількома показниками. Слід зауважити, що існує два методи обчислення показників надійності за даними про відмови:

1. Обчислення показників за експериментальними даними при невідомому законі розподілу напрацювання до відмови;
2. Обчислення параметрів надійності за відомим теоретичним законом розподілу напрацювання до відмови.

Статистичною оцінкою $R(t)$ при невідомому законі розподілу служить відношення:

$$R(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (3.1)$$

де N_0 – число об'єктів на початку випробування;
 $n(t)$ – число об'єктів, які відмовили за час t .

Розглянемо основні показники надійності:

Функцією надійності називають функцію, що виражає ймовірність того, що T – випадкове напрацювання до відмови – буде більше заданого напрацювання $(0; t)$:

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (3.2)$$

Основні властивості функції надійності $P(t)$:

1. $P(0) = 1$ об'єкт в момент початку експлуатації виправлений.
2. $P(t)$ – монотонно спадна функція.
3. $P(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty \Rightarrow$ будь-який об'єкт з часом відмовить.

Найчастіше в якості показника безвідмовності використовують ймовірність безвідмовної роботи – $R(t)$ імовірність того, що в межах заданого напрацювання не виникає відмови об'єкта.

Поряд з функцією надійності часто використовують функцію ненадійності:

$$q(t) = 1 - P(t) = P\{T \leq t\}, \quad (3.3)$$

вона характеризує ймовірність відмови в інтервалі $(0; t)$.

До основних показників надійності відносять також:

- щільність розподілу напрацювання до відмови $f(t)$;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

1. *Середнє напрацювання до відмови* – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови. (для об'єктів, що не ремонтуються)

2. *Середнє напрацювання на відмову* – відношення напрацювання системи до математичного сподівання кількості її відмов протягом цього напрацювання (для ремонтівних об'єктів)

3. *Інтенсивність відмов* – умовна щільність імовірності виникнення відмови, що визначають для розглядуваного моменту часу за умови, що цього моменту відмова не виникла.

Якщо розглядати функціонування системи в конкретному проміжку часу $[t_1; t_2]$, інтенсивність відмов можна виразити як

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R_2(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)}. \quad (3.4)$$

Інтенсивність відмов є функцією часу, і якщо інтервал $(t_1; t_2)$ подати як $[t; t + \Delta t]$ та спрямувати Δt до нуля, то дістанемо миттєве значення інтенсивності відмов:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t_1) - R(t_2)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{1}{R(t)} \left[-\frac{d}{dt} R(t) \right] = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.5)$$

Таким чином, функції $f(t)$, $R(t)$ і $h(t)$ взаємозв'язані, і знаючи одну з них, можна визначити решту.

Статистичним визначенням інтенсивності відмов $\lambda(t)$ служить вираз:

$$\lambda(t) = \frac{n_{\Delta t}(t)}{N_{\text{cp}} \cdot \Delta t}, \quad (3.6)$$

яке задається співвідношенням числа об'єктів, які відмовили в інтервалі часу $[t; t + \Delta t]$ чи $[t_1; t_2]$ до середнього числа об'єктів, справно працюють в даному інтервалі часу $[t_1; t_2]$ за умови, що об'єкти, які відмовили не відновлюються і не замінюються новими:

$$N_{\text{cp}} = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2} = \frac{N(t_1) + N(t_2)}{2}. \quad (3.7)$$

1. Гамма-відсоткове напрацювання до відмови – це напрацювання, протягом якої відмови об'єкта не виникає з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

2. Параметр потоку відмов – відношення середнього числа відмов за довільно малу наробку до значення цієї наробки.(відновлення)

Існують особливості визначення наведених показників безвідмовності, зокрема, параметр потоку відмов, середнє напрацювання на відмову. Як правило, їх визначають для об'єктів, які відбудовують, тобто там, де передбачено поновлення працездатного стану після надходження відмови, а інтенсивність відмов – для не поновлюваних.

До основних комплексних характеристик надійності відновлених об'єктів відносять – коефіцієнт готовності, параметр потоку відновлень.

Коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу t :

$$K_r = \frac{t_{\text{cp}}}{t_{\text{cp}} + t_{\text{в}}}, \quad (3.8)$$

де t_{cp} – середнє напрацювання на відмову використовуваного об'єкта;

$t_{\text{в}}$ – середній час відновлення об'єкта після відмови.

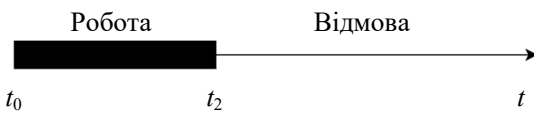
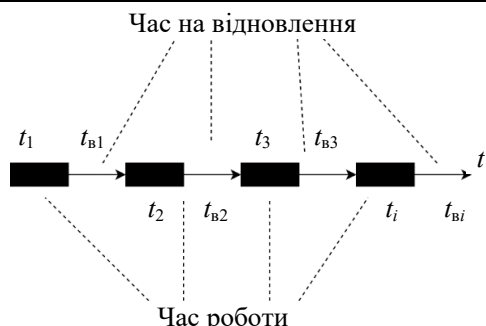
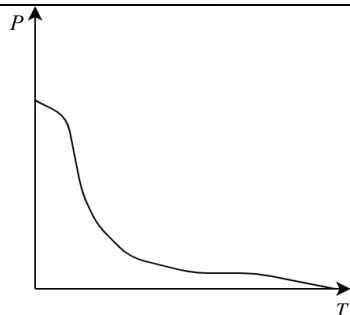
Статистично K_r визначається відношенням сумарного часу безвідмовної роботи до суми часу безвідмовної роботи і відновлення:

$$K_r = \frac{\sum_1^n t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^n t_{bi}} \quad (3.9)$$

Характеристики безвідмовності відновлюваного і невідновлюваного об'єкта представимо у вигляді таблиці (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Характеристики безвідмовності відновлюваного і невідновлюваного об'єкта

Невідновний об'єкт	Відновлювальний об'єкт
 <p>Робота</p> <p>Відмова</p> <p>t_0 t_2 t</p>	 <p>Час на відновлення</p> <p>t_1 t_{B1} t_2 t_{B2} t_3 t_{B3} t_i t_{Bi} t</p> <p>Час роботи</p>
$R(t) = \frac{N_0 - n_t}{N_0}$	$K_r = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_B}$
$\lambda(t) = \frac{n_{\Delta t}(t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}$	$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F_1(t_1 t + \Delta t)}{\Delta t_B}$
 <p>P</p> <p>T</p>	$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_B(t_B; t_B + \Delta t_B)}{\Delta t_B}$ – параметр потоку відновлювань; $P_B(t_B; t_B + \Delta t_B)$ – імовірність того, що відновлення об'єкта, що відмовив завершиться в інтервалі часу $[t_B; t_B + \Delta t_B]$

Довговічність природно оцінювати сумарним напрацюванням пристрою від моменту виготовлення до моменту списання, коли подальше відновлення стає безглуздом через високу вартість ремонту або ж через те, що після ремонту пристрій здатний безвідмовно пропрацювати лише короткий термін. На жаль, прийнята система збору даних про продуктивність механізмів така, що не дає можливості розумно підійти до оцінки їх довговічності. Припустимо для визначеності, що нас цікавить невеликі моторчики потужністю в 1,5...2,2 кВт. Таких двигунів в народному господарстві сотні тисяч, якщо не мільйони. Вони недорогі, але за прийнятий термін експлуатації (5...6 років) повинні кілька разів капітально ремонтуватися. Нам не вдалося отримати достовірних даних про розподіл у часі моментів, коли виявляються необхідні ремонти, і про вартість цих ремонтів. Адже якщо початковий період в два-три роки вільний від необхідності проведення капітальних замін і ремонтів і вони припадають, як правило, на заключну фазу експлуатації, то виникає питання про раціональне перегляд термінів їх використання. Можливо, їх взагалі недоцільно ремонтувати на місці, а потрібно після трьох-чотирьох років роботи здавати на спеціалізовані підприємства для серйозного оновлення або заміни на нові. Подібні питання до сих пір ще недостатньо з'ясовані, і на них слід звернути пильну увагу.

Довговічність системи визначає її властивість зберігати працездатний стан до настання граничного стану при установленій системі технічного обслуговування та ремонту. Основні показники довговічності системи такі:

1. Середній ресурс (або термін служби), пов'язаний з виходом за допустимі межі основних технічних характеристик та початком граничного стану;

2. Гамма-відсотковий ресурс – напрацювання, протягом якої система не набуде граничного стану із заданою імовірністю γ ;

3. Призначений ресурс (термін служби) – сумарне напрацювання системи, при досягненні якої, застосування за призначенням має бути припинене.

Показники безвідмовності та довговічності для складних технічних систем, в основному, визначають рівень їх надійності, ефективність експлуатації та забезпечуються під час проектування, виготовлення і функціонування.

Ремонтопридатність виробів природно вимірювати або часом, який слід витратити на виправлення виробу та приведення його в працездатний стан, або ж вартістю ремонту. У складних умовах експлуатації (пустеля, гори, відкрите море та ін.) Особливо важливо, щоб ремонт можна було провести в найкоротші терміни і малими зусиллями. На жаль, до сих пір конструктори звертають на питання ремонтпридатності недостатню увагу, і нам неодноразово доводилося спостерігати, як непродуманість конструкції капота автомашини або ж невдале розташування деталей радіоапаратури призводить до непомірного ускладнення найпростіших операцій з відновлення працездатності.

Кількісно ремонтпридатність систем визначають декількома показниками :

1. Імовірність поновлення працездатного стану як імовірність того, що час поновлення не перевищить заданого;

2. Середній час поновлення працездатного стану – математичне сподівання часу поновлення технічної системи після відмови. Властивість технічних систем зберігати значення показників безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності протягом їх зберігання або транспортування називають збереженістю систем. Ця властивість також характеризує надійність систем.

Для комплексної оцінки рівня надійності технічних систем застосовують показники, які містять інформацію про безвідмовність, довговічність та ремонтпридатність систем. Основні комплексні показники надійності такі:

1. Коефіцієнт готовності – імовірність того, що система опиниться в працездатному стані в довільний момент часу;

2. Коефіцієнт технічного користування – відношення математичного сподівання інтервалів часу перебування системи в працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних сподівань інтервалів часу перебування системи в працездатному стані та пристроїв, які зумовлені відмовами;

3. Коефіцієнт збереження ефективності – відношення значень показника ефективності за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, обчисленого за умови, що відмов системи протягом самого періоду експлуатації не виникає. У якості такого показника для різних систем можуть бути економічні показники, рівень продуктивності, величина споживаних ресурсів тощо.

Лекція 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ. ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ ВІДМОВ

Для розрахунку і визначення показників надійності необхідно знати теоретичний закон розподілу напрацювання на відмову, який зазвичай пов'язаний з фізико-хімічними, зношування та іншими явищами, що відбуваються всередині системи. Розглянемо основні види цих законів:

4.1. Експоненціальний розподіл (показовий розподіл)

Вид залежностей основних показників надійності від часу наведено на рис. 4.1.

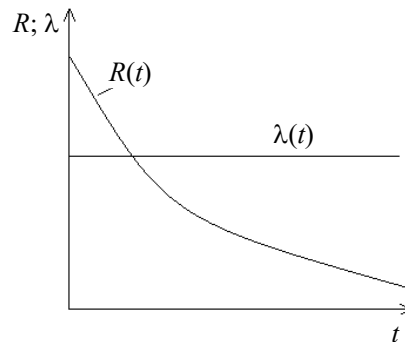


Рис. 4.1. Вид залежностей основних показників надійності R та λ від часу при експоненціальному розподілі: $R(t)=e^{-\lambda t}$ – ймовірність безвідмовної роботи; $\lambda = \text{const}$ – інтенсивність відмов

Середнє напрацювання на відмову:

$$t_{\text{cp}} = \frac{1}{\lambda}; \quad T = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (4.1)$$

Широке поширення експоненціального розподілу виправдовується простими рівняннями з одним аргументом – λ , який найчастіше визначається експериментально.

Показовим розподілом користуються, як правило, в розрахунках для орієнтування в якості першого наближення.

Показовий розподіл типове для об'єктів, елементи якого мають різні закони розподілу.

4.2. Нормальний розподіл

Вид залежностей основних показників надійності від часу наведено на рис. 4.2.

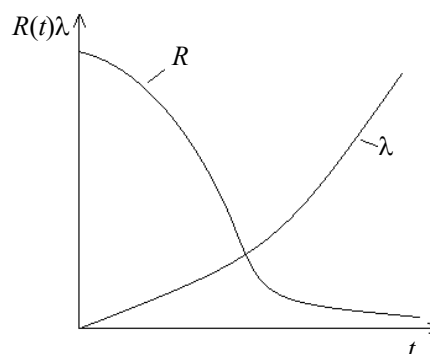


Рис. 4.2. Вид залежностей основних показників надійності R та λ від часу при нормальному розподілі

Якщо виріб виготовлений в усталених виробничих умовах з невеликим розбігом робочих параметрів при домінуючому впливі будь-якого одного механізму руйнування (знос), то найчастіше для опису параметрів надійності застосовується нормальний закон розподілу.

Закон двохпараметричний:

T_{cp} – час безвідмовності роботи;

σ^2 – дисперсія часу безвідмовності роботи.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (t - t_{cp})^2} . \quad (4.2)$$

Ймовірність безвідмовності роботи:

$$R(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{t - T_{cp}}{\sigma} \right), \quad (4.3)$$

де Φ – функція Лапласа (значення табульованого в більшості довідників і підручників з теорії ймовірності).

Інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\sqrt{2} \exp \left[-\frac{(t - T_{cp})^2}{2\sigma^2} \right]}{\sqrt{\pi} \sigma \left[1 - \Phi \left(\frac{t - T_{cp}}{\sqrt{2} \sigma} \right) \right]}. \quad (4.4)$$

4.3. Логарифмічно-нормальний розподіл

Назва прийнято внаслідок того, що логарифм часу відмови або відновлення підпорядковується нормальному закону. Використовується для визначення надійності електронної та номерної техніки. Логарифмічно-нормальний розподіл має місце, коли величина основного параметру виробу характеризується в початковий момент нормальним розподілом і змінюється в часі по експоненту (рис. 4.3).

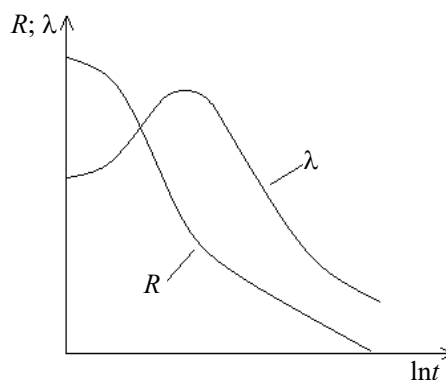


Рис. 4.3. Вид залежностей основних показників надійності R та λ від часу при логарифмічно-нормальному розподілі

$$R(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{\ln t - \ln T_{cp}}{\sigma} \right); \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{0,43}{\sqrt{2\pi}t\sigma} \cdot \frac{\exp\left[\frac{1}{2\sigma^2}(\ln t - \ln T_{cp})^2\right]}{1 - \Phi\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}(\ln t - \ln T_{cp})\right]}. \quad (4.6)$$

Математичне очікування часу безвідмовної роботи:

$$T = T_{cp} \exp\left[\frac{\sigma^2}{2(0,43)^2}\right]. \quad (4.7)$$

4.4. Розподіл Вейбулла (отримано на початку 40-х шведським математиком Вейбуллом)

Розподіл Вейбулла – запропоновано на початку 40-х шведським математиком Вейбуллом.

Експлуатація складних систем (в тому числі приладів, обладнання, технологічних систем та ін.) показує, що існує три характерні етапи залежності інтенсивності відмов від часу (рис. 4.4):

1. Інтенсивність відмов λ монотонно зменшується, що характерно для періоду приробітки, протягом якого проявляються всі дефекти обумовлені технологічними причинами;
2. Інтенсивність відмов λ – стала, що відповідає періоду нормальної експлуатації. В цей період виникає лише раптові відмови;
3. Інтенсивність відмов λ монотонно зростає, що свідчить про настання періоду катастрофічного зношування. Превалюють поступові відмови.

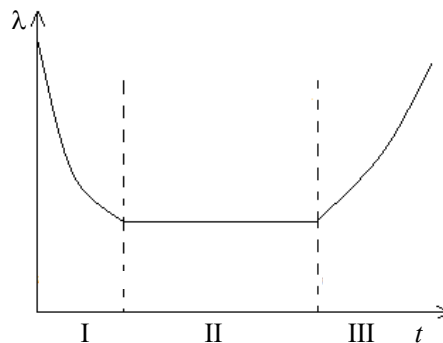


Рис. 4.4. Вид залежності λ від часу за розподілом Вейбулла:

I – приробіток; II – нормальна експлуатація; III – катастрофічний час

Зазначені три види залежностей λ від t можна отримати використовуючи двохпараметричний розподіл Вейбулла (рис. 4.5), для якого:

– імовірність безвідмовності

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t^k}; \quad (4.8)$$

– інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot k \cdot t^{k-1}; \quad (4.9)$$

– середній час напрацювання на відмову

$$T = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}, \quad (4.10)$$

де $\Gamma\left(\frac{1}{k}+1\right)$ – гамма функція, якщо $\left(\frac{1}{k}+1\right)$ – ціле, то $\Gamma\left(\frac{1}{k}+1\right) = \left(\frac{1}{k}\right)!$.

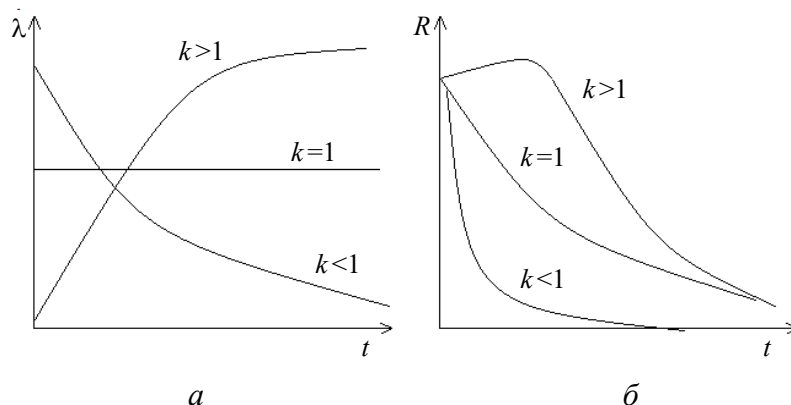


Рис. 4.5. Вид залежностей показників надійності λ (а) та R (б) від часу за розподілом Вейбулла

З графіків і видно, що при $k = 1$ розподіл Вейбулла переходить в показний, при $k > 1$ – інтенсивність відмов зростає, при $k < 1$ – інтенсивність відмов зменшується.

Параметр λ_0 – задає масштаб кривої по осі абсцис, k – гостроту та асиметрію розподілу.

4.5. Гамма-розподіл

Гамма-розподіл – характеристики мають вид близький до розподілу Вейбулла, тому приблизно збігаються області їх застосування Гамма-розподіл застосовують:

- при оцінці надійності систем в початковий період експлуатації;
- для високонадійної електронної апаратури з інтенсивністю λ , що зменшується у часі;
- для систем з резервуванням «заміщенням», якщо напрацювання на відмову основних і резервних елементів підкоряються показовому закону. При цьому k – сумарна кількість елементів в системі.

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}; \quad (4.11)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}; \quad (4.12)$$

$$T = \frac{k}{\lambda_0}. \quad (4.13)$$

4.6. Розподіл Релея

Інтенсивність відмов λ зростає лінійно в часі (рис. 4.6), тому цей розподіл застосовують для систем з явно вираженим ефектом старіння.

$$R(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}; \quad (4.14)$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma^2}; \quad (4.15)$$

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma. \quad (4.16)$$

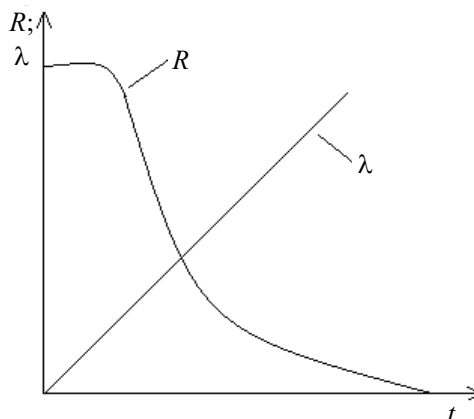


Рис. 4.6. Вид залежностей основних показників надійності R та λ від часу при розподілі Релея

Зазвичай раптові відмови і постійні відмови є результатом дрейфу робочих параметрів виробу в період експлуатації виникають незалежно один від одного. При цьому імовірність безвідмовної роботи виробу визначається добутком:

$$R_0(t) = R_1(t) \cdot R_2(t), \quad (4.17)$$

де $R_1(t)$ та $R_2(t)$ – відповідна імовірність роботи виробу, при відсутності раптових і поступових відмов.

4.7. Моделювання надійності на основі фізики відмов

Причини виникнення відмов при функціонування будь-якої складної технічної системи, можуть бути описаними такими теоретичними схемами:

- схема миттєвих пошкоджень, за якої відмова настає незалежно від того, як довго машина експлуатувалась;
- схема пошкоджень, що накопичуються. Відмова утворюється через поступове накопичення пошкоджень (старіння та зношення);
- схема релаксації. Поступове накопичення пошкоджень може бути не прямою, а лише посередньо причиною відмови, при цьому характерне сполучення поступового накопичення пошкоджень зі стрибкоподібною зміною стану об'єкта;
- схема дії декількох незалежних причин, яка на практиці є найбільш типовою, але найбільш складно описується аналітично.

Вибір певної схеми виникнення відмов для моделювання надійності гідромашин визначається конкретними умовами їх виготовлення та експлуатації.

Розглянемо приклад моделювання надійності гідронасосів.

Аналіз причин відмов гідронасосів дозволяє поділити їх на дві групи:

1. Перша група – раптові відмови деталей та вузлів, до них належить: руйнування блока циліндрів; руйнування стопорного кільця, руйнування підшипників, руйнування притискної пластини, вала-шестерні, повторного корпусу. Причинами відмов цієї групи є неякісний матеріал самих деталей, брак під час обробки та складання, порушення умов

експлуатації, передбачених паспортними даними. Тут характерно, що відмова елемента настає незалежно від того, який час машина експлуатувалась. Навантаження, які діють на гідромашину в цілому й на її окремі вузли завжди є випадковими. Це пов'язане з неминучими випадковими коливаннями зовнішніх умов та випадковими флуктуаціями взаємодії елементів між собою. Відмова в цьому випадку виникає як наслідок взаємодії пікових навантажень.

Дана схема виникнення раптової відмови описується експоненціальним законом розподілу часу безвідмовної роботи:

$$P(\tau > T) = e^{(-\lambda T)}, \quad (4.18)$$

де $P(\tau > T)$ – імовірність того, що час безвідмовної роботи τ більший за T ;

λ – величина обернена до середнього часу безвідмовної роботи.

Гідромашина – це складна технічна система, в якій відмови елементів взаємно незалежні. При цьому відмову будь-якого вузла або деталі розглядають як відмову всієї системи. Такі системи називатиме ланцюговими. Припустимо, що всі вузли та деталі гідромашин, що зазнають раптових відмов, мають експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи, а їхнє число елементів ланцюгової системи k є значним (що відповідає нашому випадку).

Можна показати, що час безвідмовної роботи такої системи підпорядковується закону Вейбулла:

$$P(\tau > T) = e^{-\frac{T^\gamma}{\beta}}, \quad P_1 = e^{-\lambda_0 t}, \quad (4.19)$$

де $\gamma, \beta, \lambda_0, k$ – параметри розподілу Вейбулла.

2. Друга група відмов – це поступові відмови, пов'язані зі зносом пар тертя гідромашини. В цьому випадку відмова утворюється за рахунок поступового накопичення пошкоджень, причому сам знос є не прямою, а лише посередньою причиною відмови, так як при цьому знижується загальній ККД гідромашин, падають тиск та продуктивність, що й характеризує її відмову. В цьому випадку випадкова функція зміни параметрів гідромашин частіш і являє собою випадкову функцію з сильним переміщенням, для якої закон розподілу наробки на відмову є нормальним:

$$P(\tau > T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{T-c}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du, \quad R_2 = 1 - \Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right), \quad (4.20)$$

де c, σ – математичне сподівання та середньоквадратичний час безвідмовної роботи.

Під час функціонування гідромашин кожен з видів відмов діє паралельно й незалежно один від одного. Припустимо, що якщо б причина відмови Π_i була єдиною, то час безвідмовної роботи дорівнював би τ_i . Який же буде час τ безвідмовної роботи при паралельній дії всіх k причин? Очевидно, що з моменту, коли одна з причин вже викликала відмову об'єкта, для інших причин не може змінити становища. Тому час, упродовж якого об'єкт працюватиме безвідмовно, є часом до моменту, коли одна з причин

$\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$ викликає відмову. Якщо причина Π_i викликала відмову, то час безвідмовної роботи дорівнюватиме τ_i . Якщо усунути причину Π_i , то час безвідмовної роботи збільшиться, так як до моменту τ_i відмов з інших причин не було. Звідси випливає, що час безвідмовної роботи τ_i задають рівністю

$$\tau = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k), \quad (4.21)$$

яка означає, що τ – це час, мінімальний з величин τ_i .

Якщо $F_i(T)$ є функцією розподілу часу τ_i безвідмовної роботи при ізольованій дії i -ї причини, то функцію розподілу часу τ подають так

$$F(T) = 1 - [1 - F_1(T)] [1 - F_2(T)] \dots [1 - F_k(T)] \quad (4.22)$$

Рівняння для гідромашин можна уточнити: $F_1(T)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи під час дії тільки раптових відмов.

$$F_2(T) = 1 - e^{-\frac{T^\gamma}{\beta}}, \quad (4.23)$$

де $F_2(T)$ – функція часу безвідмовної роботи при дії тільки поступових відмов.

$$F_2(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{T-c}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du, \quad R_2 = \Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right), \quad (4.24)$$

де $\Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right)$ – інтервал Лапласа.

Тоді функція часу безвідмовною роботи гідромашини при дії всіх видів відмов:

$$F(t) = 1 - \left[1 - \Phi\left(\frac{T-c}{\sigma}\right) \right] \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{T^\gamma}{\beta}} \right) \right]. \quad (4.25)$$

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(\tau > T) = 1 - F(T) = e^{-\frac{T^\gamma}{\beta}} \left[1 - \Phi\left(\frac{T-c}{\sigma}\right) \right]. \quad (4.26)$$

Таким чином, рівняння опису імовірність безвідмовності роботи гідромашини при одночасній дії всіх видів відмов, що відповідає реальному стану експлуатації гідромашин.

Лекція 5. МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

5.1. Моделювання надійності випадкових процесів

Слід зауважити, що вимірювання показників надійності є куди більш складною задачею, ніж вимір звичних нам фізичних величин – температури, сили струму, напруги магнітного поля. Це викликано тим, що надійність пов'язана з процесами, які відбуваються не тільки в даний момент, але ще будуть відбуватися у продовж тривалого терміну. В цьому відношенні теорія надійності нагадує собою страхування, яке також спрямовано не в минуле і сьогодні, а в майбутнє.

Ми постараємося тепер викласти загальну модель зміни надійності будь-якого технічного виробу. Ця модель була запропонована вперше в книзі трьох авторів [1]. Поки ми не знаємо іншої моделі, здатної охопити всі ситуації, з якими доводиться стикатися в теоретичних і прикладних питаннях, пов'язаних із забезпеченням надійності технічних виробів і розрахунком їх надійності.

Ми виходимо з того, що якість виробу, в тому числі і його надійність, характеризується деяким набором його параметрів $x = (x_1, x_2, x_3, \dots)$, який може бути кінцевим або нескінченним. Для моделі це байдуже. Істотним буде лише те, що це повне визначення стану системи завданням значень у всіх його параметрах. У зв'язку з цим ми будемо отожднювати стан системи з точкою x , тобто значеннями всіх параметрів.

Позначимо через X простір можливих станів системи. Згідно з визначенням це простір складається з усіх можливих точок x , в яких може знаходитися система. Простір X може бути дуже простим, наприклад, складатися тільки з двох станів – x_1 та x_2 . У першому стані система працездатна, у другому – непрацездатна. Однак, як правило, доводиться мати справу з більш складними ситуаціями.

У кожен момент часу t система знаходиться в деякому стані $x(t)$, яке, звичайно, належить X і залежить від часу t . Залежно від умов, в яких знаходиться система, стан $x(t)$ може залишатися порівняно тривалий період часу практично незмінним або ж досить швидко змінюється. Наприклад, можна вважати, що колесо автомобіля, що знаходиться в багажнику, практично не змінює своїх властивостей, оскільки воно не несе на собі навантаження (фактично ж його властивості з часом, звичайно, змінюються – гума сохне, змінює свою структуру). Якщо ж колесо працює на ґрунтовій дорозі, то його знос відбувається дуже швидко. Таким чином, стан системи в просторі X з часом описує траєкторію $x(t)$. Ця траєкторія дає повну картину зміни властивостей технічної системи.

В силу тих чи інших міркувань в просторі X виділяється безліч A , потрапляння в яке вважається неприпустимим, і кожен раз, як тільки наша технічна система потрапляє в якусь із станів безлічі A , вважається, що вона потрапила в відмовний стан. Зрозуміло, що вибір безлічі A найвищою мірою умовний і визначається тими цілями, для яких призначена технічна система. Тому може статися, що в різних випадках для однієї і тієї ж системи доводиться вибирати різні безлічі A як відмовних. Вибір A в значній мірі обумовлено відповідальністю тих функцій, які доручаються системі. Як ілюструє приклад розглянемо напівпровідникові елементи – діоди, транзистори, які використовуються в багатьох електронних приладах – приймачах, апаратах «штучне серце» і т.і. Якщо в приймачах, особливо масового користування, навіть різке погіршення роботи елемента ще вважається допустимим, то в апараті «штучне серце» вихід параметрів за границі на 1...2 % вже загрожує небезпекою для пацієнта. І якщо в першому випадку в якості безлічі A можна вибрати зовсім незначну область, то в другому випадку ця область буде досить велика. Це природно, оскільки навіть невеликі зміни характеристик роботи системи небезпечні для життя пацієнта.

На жаль, безліч X і траєкторія $x(t)$, для більшості технічних виробів вивчені дуже слабо, а тому утруднено і вказівку раціонального вибору безлічі A . Тому доводиться йти іншим шляхом, який призводить до значних перевитрат засобів, саме, заздалегідь призна-

чається граничний термін використання. Так, наприклад, літаки «Боїнг 720» після 2000 року експлуатації повинні відходити на капітальний ремонт незалежно від їх стану. Особливо суворо при цьому стежать за двигуном. Багато з двигунів, знятих з літака, пізніше використовуються для різних господарських цілей ще тривалий час при дуже високих навантаженнях.

Вивчення функції $x(t)$ для задач теорії і практики надійності має винятково велике значення, оскільки воно повністю описує долю виробів, дозволяє визначити всі числові характеристики його надійності. Строго кажучи, ця функція залежить не тільки від часу, але і від режиму роботи, і тому слід було б для кожного моменту t вказувати умови експлуатації. Уявлення про те, що функція $x(t)$ має детермінований характер, знаходиться в протиріччі з величезним досвідом випробувань і поведінки технічних виробів в реальних умовах експлуатації. Спеціальні експерименти, пов'язані з зношуванням матеріалів в результаті механічного тертя або ударної дії, старіння речовини від магнітного, електричного, хімічного, теплового або вібраційного впливів, призводять в загальних рисах приблизно до однієї і тієї ж картини: однакові вироби, що виготовлені в одних і тих самих умовах, поведуться при випробуваннях або ж при експлуатації зовсім по-різному, і завжди спостерігається значний розкид траєкторій $x(t)$. Експериментальні дослідження дають тверду основу для того, щоб дивитися на функцію $x(t)$ як на випадковий процес. Саме це уявлення і покладено в основу переважної більшості робіт з теорії надійності. Однак слід зауважити, що до цих пір ці процеси вивчені зовсім недостатньо і численні завдання, як теоретичного, так і прикладного плану, вимагають більшої уваги до організації їх вивчення. До теперішнього часу, по суті, є лише результати по дослідженню тривалості життя технічних систем.

5.2. Основні відомості з теорії випадкових функцій

Функція $X(t)$ – називається випадковою функцією, якщо її значення при будь-якому аргументі t є випадковою величиною.

Приклад випадкових функцій $T(h)$ – температура повітря залежить від висоти над землею.

Реалізацією випадкової функції $X(t)$ – називається конкретний вид, який вона приймає в результаті досліду (рис. 5.1).

Ряд проведених дослідів, результат кожного з яких – випадкова функція $X(t)$ дає сукупність (ансамбль) реалізацій $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ цієї наступної функції (рис. 5.2). Реалізації неминуче відрізняються одна від одної через випадкові причини.

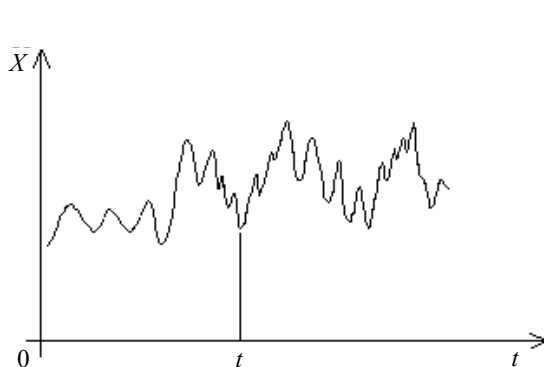


Рис. 5.1. Випадкова функція $X(t)$

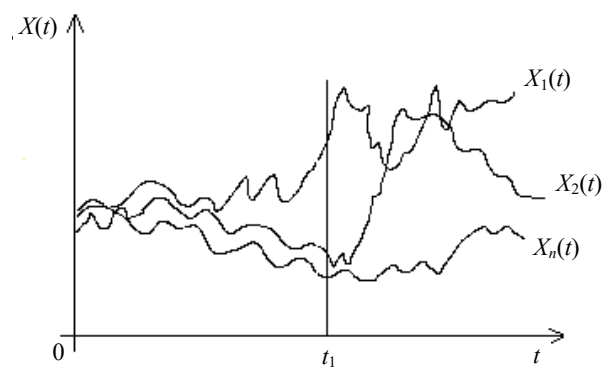


Рис. 5.2. Сукупність випадкових функцій $X_n(t)$

Для фіксованої величини аргументу випадкова функція перетворюється в звичайну випадкову величину. Ця випадкова величина називається перетином випадкової функції.

Випадкова функція $X(t)$, аргументом якої є час, що називається випадковим процесом. Випадковий процес протікає в системі S полягає в тому, що з плином часу t система S випадковим чином змінюють свій стан. Це і є функцією фізичною основою надійності системи.

Випадкові процеси поділяються на класи за рядом ознак (рис. 5.3, табл. 5.1):

1) випадковий процес з дискретним часом – такий процес, при якому переходи системи S з одного стану в інший можливі лише в певні моменти часу t_1, t_2, \dots . Переходи в інший стан тільки після огляду, який проводиться за розкладом. Випадковий процес з дискретним часом називається випадковою послідовністю;

2) випадковий процес з безперервним часом – процес, при якому переходи системи S з одного стану в інший можуть відбуватися в будь-які випадкові моменти часу (зміна напружень в мережі);

3) випадковий процес з дискретним станом – такий процес, при якому число можливих станів системи S (система складається з двох вузлів: S_1 – працює a_1 ; S_2 – працює a_2 ; S_3 – працює – 2 вузли $a_1 + a_2$; S_4 – не працює два вузли);

4) випадковий процес з безперервним станом – безліч станів система S – незліченно. Поєднання наведених ознак дає різновиди складних процесів.

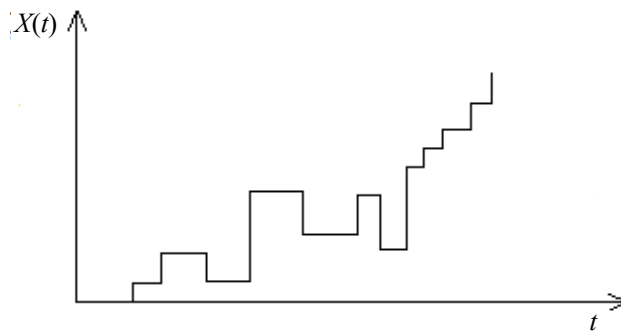


Рис. 5.3. Випадковий процес

Таблиця 5.1

Випадкові процеси

З дискретними станом і дискретним часом	З дискретними станом і безперервним часом	З безперервним станом і дискретним часом	З безперервним станом і безперервним часом
1+3	3+2	1+4	2+4

Математичне сподівання випадкових функцій $X(t)$ – називається не випадкова функція $m_x(t)$, яка при кожному значенні аргументу t є математичним очікуванням відповідного перетину випадкової функції (рис. 5.4):

$$m_x(t) = M[x(t)]. \quad (5.1)$$

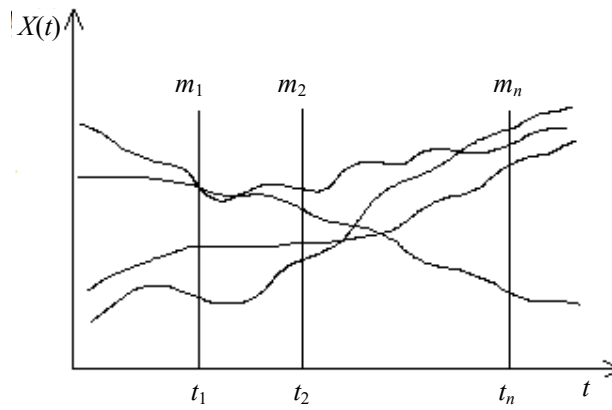


Рис. 5.4. Математичне сподівання випадкових функцій $X(t)$

Кореляційною (або автокореляційною) функцією випадкової функції $X(t)$ – називається не випадкова функція двох аргументів $K_x(t, t')$, яка при кожній парі значень аргументів t, t' дорівнює кореляційному моменту відповідних перетинів випадкової функції:

$$K_x(t, t') = M[\dot{x}(t) \cdot \dot{x}(t')] = M\{[x(t) - m_x(t)][x(t') - m_x(t')]\}, \quad (5.2)$$

де $\dot{x}(t) = x(t) - m_x(t)$ – центрована випадкова функція, при $t = t'$ кореляційна функція перетворюється в випадкову функцію:

$$K_x(t, t) = D_x(t) = \sigma_x^2(t) = M\{[x(t) - m_x(t)]^2\}. \quad (5.3)$$

Нормованою кореляційною функцією (коефіцієнт кореляції) випадкової функції $x(t)$ є функція:

$$r_x(t, t') = \frac{k_x(t; t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')} = \frac{k_x(t; t')}{\sqrt{D_x(t) - D_x(t')}}. \quad (5.4)$$

Стационарної випадкової функції $X(t)$ – називається випадкова функція, математичне очікування якої стало $m_x = \text{const}$, а кореляційна функція залежить тільки від різниці її аргументів (рис. 5.5): $K_x(t_1 + t') = K_x(\tau)$, де $\tau = t' - t$.

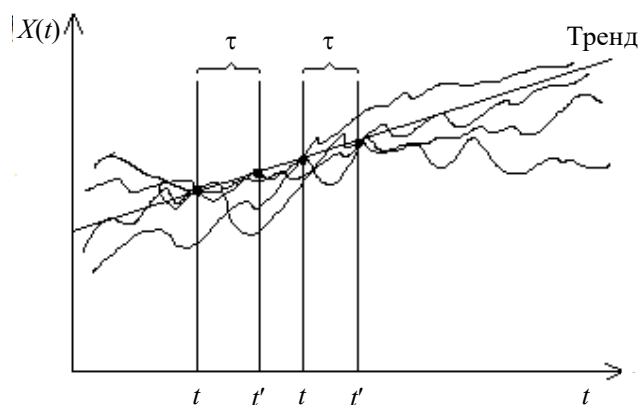


Рис. 5.5. Стационарна випадкова функція $X(t)$

Тренд випадкової функції – визначає зміну положення математичне очікування різних перетинів зі збільшувальним часом.

Ергодична випадкова функція – по одній реалізації можна визначити властивості всього ансамблю.

Лекція 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

Визначення та розрахунок системи ґрунтується на докладному вивченні змін контрольованого параметра під час експлуатації або короткочасних випробувань системи. При цьому визначають закон розподілу наробки до відмови, тобто до моменту порушення параметра заданих умов працездатності. Закон розподілу наробки до відмови вибирають на підставі відповідальної моделі відмов, побудованої за зареєстрованими реалізаціями параметра та інформації про природу процесів старіння системи даного класу.

В основі побудови математичних моделей відмов систем та розрахунку їх надійності лежить конкретне сполучення виду випадкової функції $x(t)$, що описує зміну величини контрольованого параметра та допустимої границі $a(t)$, перетин якої випадковою функцією вважають моментом відмови системи.

Для розрахунку надійності технічних систем, в яких виникають раптові та поступові відмови, застосовують такі різновиди випадкових функцій:

- 1) детермінована випадкова функція;
- 2) стаціонарна випадкова функція;
- 3) випадкова функція з незалежним приростами;
- 4) випадкова функція з сильним переміщенням.

Розглянемо більш докладно кожен з приведених випадкових функцій:

1. *Детермінована випадкова функція.*

У задачах визначення надійності, як правило, має монотонні реалізації, кожна з яких здійснює тільки один (перший) викид за рівень a . Імовірність безвідмовної роботи визначають співвідношенням:

$$B_{ep} \{ \tau > t \} = B_{ep} \{ x(t) < a \}, \quad (6.1)$$

при лінійних реалізаціях функція надійності має вигляд:

$$P(t) = B_{ep} \{ Q + ht < a \}, \quad (6.2)$$

де Q – початкове значення параметра;

h – коефіцієнт тренду.

Характерні моделі відмов цієї групи наведено на рис 6.1.

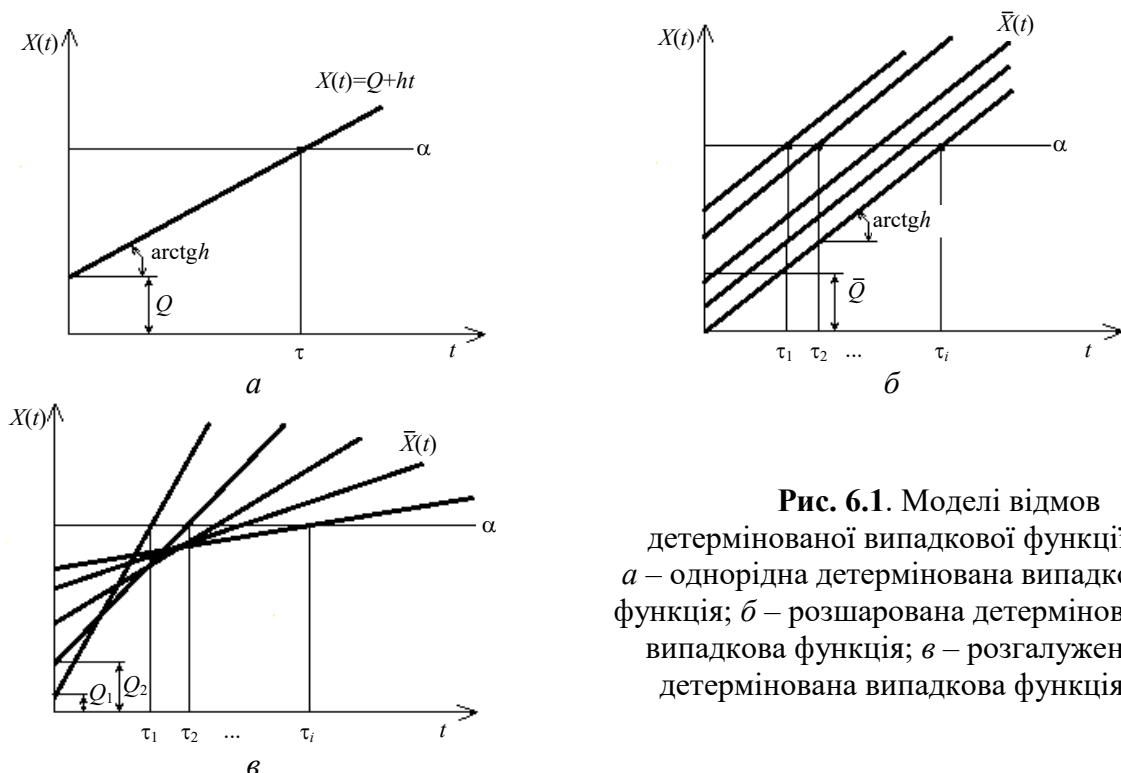


Рис. 6.1. Моделі відмов детермінованої випадкової функції: *a* – однорідна детермінована випадкова функція; *б* – розширована детермінована випадкова функція; *в* – розгалужена детермінована випадкова функція

2. Випадкове функція з незалежним приростами (рис. 6.2)

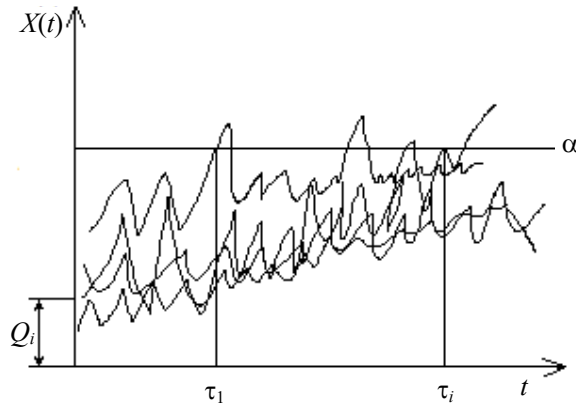


Рис. 6.2. Випадкова функція з незалежними приростами

Випадкова функція $x(t)$ має незалежні прирости:

$$x(t) = Q + ht + \sqrt{d} \int_0^t W(t') dt', \quad (6.3)$$

де Q, h, d – детермінування;
 $W(t)$ – випадкова функція «білий шум».

Закон розподілу наробки τ із зосередженою масою

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t < c \\ 0 & \text{при } t \geq c \end{cases}, \quad (6.4)$$

де $c = \tau$.
 Закон розподілу τ – нормальний:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{c-t}{\sigma}\right), \quad (6.5)$$

де $c = \frac{a - \bar{Q}}{h}$; $\sigma = \frac{\sigma_a}{h}$.

Закон розподілу наробки τ – Бернштейна:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{c-t}{\sqrt{\sigma^2 + \vartheta^2 t^2}}\right), \quad (6.6)$$

де $c = \frac{a - \bar{Q}}{h}$; $\vartheta = \frac{\sigma h}{h}$; $\sigma = \frac{\sigma_a}{h}$.

Закон розподілу наробки τ – дифузійний.

При цьому функція $x(t)$ описує дифузійний процес і закон розподілу наробки до відмов відповідає дифузійному з функцією надійності:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{c-t}{c\sqrt{\gamma t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\gamma c}\right) \Phi\left(\frac{-c-t}{c\sqrt{\gamma t}}\right), \quad (6.7)$$

де $c = \frac{a - Q}{h}$; $\gamma = \frac{d}{(a - Q)^2}$;

d – дисперсія похідної тренду параметра;
 h – математичне сподівання похідної тренду.

3. Випадкова функція із сильним перемішуванням (рис. 6.3).

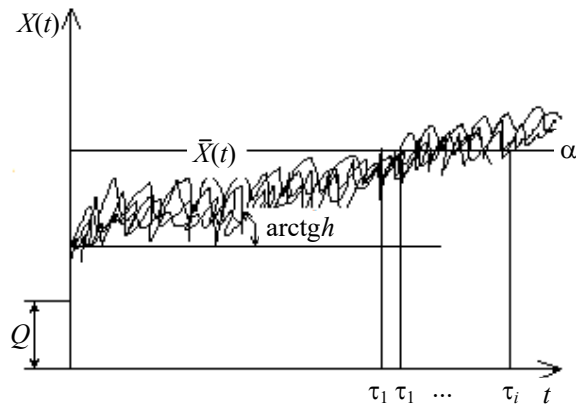


Рис. 6.3. Випадкова функція з сильним перемішуванням

Закон розподілу наробки до відмови відповідає нормальному з функцією надійності:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{c-t}{S}\right), \quad (6.8)$$

де $c = \frac{a-Q}{h}$; $S = \sqrt{\frac{d(a-Q)}{h^3}}$.

Закон розподілу наробки τ – нормальний

4. Стаціонарна випадкова функція (рис.3.4)

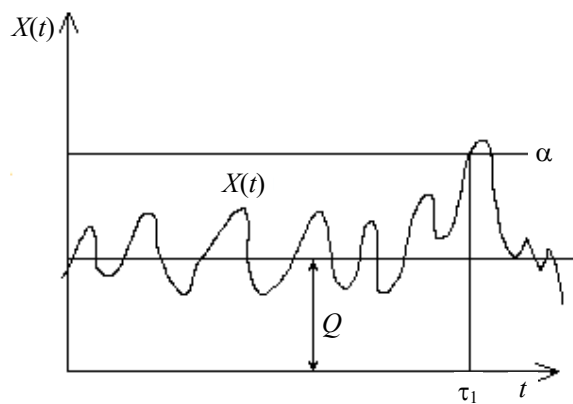


Рис. 6.4. Випадкова стаціонарна функція

Закон розподілу наробки τ – експоненціальний з функцією надійності:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (6.9)$$

де λ – інтенсивність відмов.

Закон розподілу наробки τ – експоненціальний.

Лекція 7. НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

При оцінці надійності більшості виробів і процесів їх розглядають як складні системи. Рівень надійності складних систем залежить від надійності окремих елементів, а також від схеми (структури), їх з'єднання в систему і можливостей оперативно усувати відмови. Все це відображає функціональна схема (структурна модель) надійності складної системи.

7.1. Структурні моделі надійності систем

З позиції надійності системи можуть бути послідовними, паралельними і комбінованими.

Системи з послідовним з'єднанням елементів.

Умовою роботи такої системи – є безвідмовна робота всіх підсистем (послідовне розташування технологічного обладнання в автоматичній лінії (рис. 7.1), комплект підшипників в автомобілі (при виході з ладу хоча б одного – відмова всієї системи)).

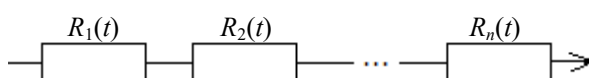


Рис. 7.1. Послідовне розташування технологічного обладнання в автоматичній лінії

За умови, що відмови кожного елемента можна розглядати як незалежні і використовуючи теорему множення ймовірностей незалежних подій визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$R_c(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t), \quad (7.1)$$

$$R_c(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (7.2)$$

При збільшенні числа послідовно з'єднаних елементів надійність системи різко зменшується і зазвичай не перевищує надійності найменш надійного елемента:

$$R_c \leq \min_i \{R_i\}. \quad (7.3)$$

Система з паралельним з'єднанням елементів (рис. 7.2).

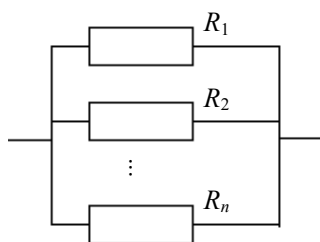


Рис. 7.2. Система з паралельним з'єднанням елементів

Система не виходить з ладу поки не відмовлять всі її елементи. Вважаючи, що всі події незалежні отримуємо:

$$F_c = \prod_{i=1}^n F_i = \prod_{i=1}^n (1 - R_i) - \text{ймовірність відмови.} \quad (7.4)$$

Ймовірність безвідмовної роботи:

$$R_c = 1 - F_c = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i). \quad (7.5)$$

Паралельне з'єднання є досить ефективним засобом підвищення надійності.

Якщо дозволяє конструкція і пристрій системи, то поетапне резервування краще загального бо якщо система при загальному резервуванні відмовляє, то при позитивному – є ймовірність її безвідмовної роботи.

В даний час не існує загальних методів визначення ймовірності безвідмовної роботи системи з довільною складною структурою. Загальна рекомендація – використовувати прямий перебір всіх станів відмов елементів, при яких система залишається ще працездатною.

7.2. Надійність технологічних систем

Якість функціонування ТС характеризують багато факторів, наприклад, продуктивність, витрата ресурсів тощо, проте, як зазначають ряд авторів [5 – 8], надійність є одним з основних показників якості функціонування, що відбиває динаміку змін параметрів процесу за часом. Для ТС процесів надійність є одним з основних показників якості ще й тому, що останнім часом у літературі ствердилось уявлення про ТС як про складну систему, для оцінки якості якої часто застосовують надійність [5]. Так, ТС процесу являє собою систему, яка складається з багатьох взаємозв'язаних елементів, що виступають як одне ціле (технологічне устаткування і оснастка, предмет і виробництво, засоби контролю, виконавці тощо), має мету функціонування – виготовлення продукту виробництва, для неї можна встановити критерії якості функціонування – точність, продуктивність, у ТС можна виділити складові частини, а сама вона є невід'ємною частиною (підсистемою) ТС більш високого рівня – підприємства. Системний підхід викликаний також прагненням прогнозувати зміни стану всієї ТС, зумовлені зміною станів окремих її частин.

Вперше поняття «надійність» для характеристики ТС ввів О.С. Проніков, визначивши «технологічну надійність верстатів» як властивість зберігати якісні показники технологічних процесів протягом заданого часу. Потім у ряді праць [2, 4] подані визначення надійності технологічної системи як властивості, яка дозволяє забезпечити протягом заданого часу отримання потрібної продукції, що цілком відповідає вимогам технічної документації. Однак, незважаючи на значну кількість праць, присвячених цій проблемі, до цих пір немає сталого загальноприйнятого визначення надійності технологічних систем процесів. Це пов'язане з тим, що багато авторів під технологічним процесом розуміють різні за об'ємом частини виробничого процесу та розглядають технологічний процес на різних рівнях виробничої ієрархії. Все це потребує подальшого уточнення понять, пов'язаних з надійністю ТС процесів.

Важливу роль відіграє також визначення показників, які кількісно характеризують рівень надійності ТС процесів. Кожна з систем, будь-то система програмового керування, система електропостачання, система механічна чи система технологічна, для оцінки своєї надійності повинна використовувати поряд з класичними показниками надійності також спеціальні показники надійності, характерні тільки для даної системи, що відбивають її особливості. Такі показники в наш час для технологічних процесів та систем відсутні, що потребує проведення додаткових досліджень щодо їх виявлення і розробки методів їхньої оцінки. Таким чином, поняття, які характеризують якість функціонування, технологічну надійність та надійність ТС процесів мають бути визначені й оцінені якісно та кількісно.

Процеси, які діють у рамках ТС під час її функціонування, поділяють на три групи [2, 4]:

1. Швидкоплинні процеси, що мають періодичність зміни, яку вимірюють частками секунди і закінчуються у межах роботи верстата при обробці однієї деталі. До них належать вібрації, зміни сил тертя в рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень, величин припуску та твердості матеріалу заготовок тощо.

2. Процеси середньої швидкості проходять за час безперервної роботи верстата, а їх тривалість вимірюють звичайно в хвилинах та годинах. Вплив процесів середньої швидкості приводить до поступового зміщення центра поля розсіяння контрольованого параметра до верхньої (нижньої) границі поля допуску. Дане зміщення викликане впливом двох домінуючих процесів середньої швидкості: температурних деформацій та зносу інструменту. Ці процеси звичайно різноспрямовані та відмінні за інтенсивністю впливу на зміщення центра поля розсіяння контрольованого параметра. Зменшення цих похибок можливе шляхом підналагодження верстата та компенсацією температурних деформацій.

3. Процеси, що проходять повільно, визначають знос механізмів та напрямних верстата, пере розділ внутрішніх напружень у деталях верстата, корозію тощо. Тривалість цих процесів – місяці та роки. Аналіз швидкості їх перебігу дозволяє визначити періодичність технічного обслуговування та ремонту верстатів.

Вплив перелічених факторів на надійність ТС залежить від того, на який період часу розраховують надійності, наприклад, на період між підналагодженнями або до зміни інструменту, або на період між капітальними ремонтами, або на весь термін служби даної технологічної системи. Від цього залежить вид моделі відмов (фізичної моделі) даної системи, яка визначає рівень надійності за певними параметрами. При цьому особливого значення набуває структура технологічного процесу (ТП), що виявляється в певній послідовності та взаємозв'язку окремих етапів, які складають ТП. У зв'язку з цим, при розв'язанні задач забезпечення надійності слід урахувувати не тільки частість відмов того чи іншого виду, але й визначити внесок окремих елементів системи (етапів ТП) у надійність та стабільність в цілому.

7.3. Аналіз та прогнозування надійності ТП

Задачі аналізу та прогнозування надійності ТС на етапі їх проектування слід розв'язувати на основі складання структурних схем [4], які повинні відбивати послідовність виконання окремих етапів ТП або характер взаємозв'язку окремих підсистем технологічної системи, нести інформацію про величини надійності окремих елементів (етапів).

Питання структурного аналізу складних технічних систем вирішуються, в основному, на підставі теорії графів. Розглядувана схема подається у вигляді багатовершинного графу, у якого вершини можуть позначати чи елементи даної системи, чи етапи «життєвого циклу» ТП, а ребра несуть інформацію про зв'язки між цими елементами (етапами). Наведений механізм набув широкого вжитку для аналізу складних систем, однак, при визначенні рівня надійності йому властиві такі недоліки:

1) при розробці моделей функціонування, де зустрічається поняття «цикл повторення», виникають труднощі при виводі виразів для показників функціонально-часової надійності;

2) при побудові будь-яких моделей функціонування складно встановити залежність структури від діючих на систему факторів зовнішнього середовища.

Ці обставини значно скорочують область застосування наведеного методу. В класичній теорії надійності структурний аналіз зводять до складання схеми резервування, де кожний елемент (етап) системи в структурній моделі розташовано або послідовно, або паралельно з іншими елементами залежно від того, чи викликає відмова даного елемента відмову всієї системи. Таким чином, частіш за все структурні схеми являють собою набір паралельно-послідовно з'єднаних елементів і не завжди вдається урахувати їх взаємний вплив. Це достатньо коректно застосовують для опису систем електричних, електронних, гідравлічних, але часто воно не відповідає функціонуванню складних механічних систем і особливо технологічних. Як зазначає проф. О.С. Проніков, «специфіка структур механічних систем міститься в тому, що резервування тут рідко застосовується в чистому вигляді. Для механічних систем більш характерне для підвищення надійності вживання принципу надмірності, який є більш загальним, чим резервування».

Для ТС набуває особливої сили, так як тут діють механізми технологічної спадковості, що значно ускладнює зв'язки між окремими етапами. При цьому з метою забезпечення високої надійності ТС можуть, по-перше, змінювати свою структуру (вводити додатковий контроль, розбивати операції на ряд переходів, змінювати режими обробки), по-друге, мати властивість саморегулювання (адаптації), тобто змінювати свої параметри, забезпечуючи потрібний рівень надійності.

Лекція 8. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

8.1. Технологічні системи

Технологічні системи (ТС) класифікують за рівнем розгляду на ТС операції, ТС процесу, ТС підрозділу та ТС підприємства. Кожній з наведених технологічних систем покладено у відповідність певні показники надійності, що дозволяють кількісно оцінити властивість надійності ТС та враховують різні цілі й задачі, які стоять перед ТС різного рівня.

Для ТС операцій та процесів основними показниками є:

1 – імовірність безвідмовної роботи за параметрами виготовлюваної продукції, тобто імовірність того, що в межах заданої наробки або календарного інтервалу часу відмови за параметрами виготовлюваної продукції не відбудеться;

2 – середня наробка поміж відмовами, що визначається відношенням наробки ТС до числа її відмов упродовж часу;

3 – коефіцієнт готовності ТС, тобто імовірність того, що ТС опиниться в працездатному стані в довільний момент часу. Часто для оцінки надійності ТС використовують інтенсивність відмови як імовірність прояву відмови в одиницю часу, обчисленої за умови, що до цього проміжку часу відмов ТС не було. При цьому враховані особливості ТС, що відрізняє їх від інших складних систем. Так, за аналогією з ремонтпридатністю вводять поняття наладко придатності ТС як властивості ТС, що міститься в її пристосованості до наладки та підналагодження. Розглянемо це поняття більш докладно.

Технологічна система процесу під час функціонування може перебувати в одному з трьох станів.

1. Наладка, яку виконують при зміні об'єкта обробки або зміні обробляючого інструменту.

2. Працездатний стан.

3. Підналагодження, яке виконують під час обробки партії деталей з метою приведення технологічної системи після закінчення певного часу її функціонування у стан, відповідний до вимог нормативно-технічної документації, що регламентує умови виробництва.

Наладкопридатність ТС процесів характеризує їх властивість, яка міститься в пристосованості до попередження та усунення відмов за допомогою наладок і підналагоджень, що не передбачені технічною документацією, а викликані наявністю двох видів відмов:

1-й вид – часті відмови з малим часом поновлення. Наприклад, вихід за межі поля допуску того чи іншого параметра деталей, що випускають /усовується підналагодженням ТС.

2-й вид – рідкі відмови із значним часом поновлення. Наприклад, поломка різального інструмента /усовується заміною інструмента й вимагає нової наладки ТС.

Наладкопридатність ТС процесів слід використовувати при оцінці коефіцієнта готовності. Як відомо, коефіцієнт готовності визначають за співвідношенням часу роботи і часу поновлення внаслідок відмови. Для технологічних систем це значить, що коефіцієнт готовності визначають співвідношенням часу на наладку та підналагодження, які виконують внаслідок відмов 1-го й 2-го видів та часу перебування системи в працездатному стані:

$$K_r = \frac{\sum T_{P_i}}{\sum T_{P_i} + \sum t_b} \Rightarrow K_r = \frac{T_3 - T_H}{T_3}, \quad (8.1)$$

де T_3 – загальний час функціонування ТС;

T_H – час на наладку та підналагодження, який можна подати в такому вигляді:

$$T_H = F_1 \cdot \bar{\tau}_1 + F_2 \cdot \bar{\tau}_2, \quad (8.2)$$

де F_1 та F_2 – імовірність появи відмов відповідно 1-го й 2-го видів;

$\bar{\tau}_1$ та $\bar{\tau}_2$ – середній час поновлення після відмов відповідно 1-го й 2-го видів.

Ураховуючи (8.3), рівняння (8.2) подамо в такому вигляді:

$$K_r = 1 - \frac{F_1 \cdot \bar{\tau}_1}{T_3} - \frac{F_2 \cdot \bar{\tau}_2}{T_3}. \quad (8.3)$$

Вирази $\frac{F_1 \cdot \bar{\tau}_1}{T_3}$ та $\frac{F_2 \cdot \bar{\tau}_2}{T_3}$ у рівнянні (8.4) характеризують наладопридатність ТС.

Кількісно наладопридатність характеризується коефіцієнтами наладопридатності 1-го й 2-го видів.

$$K_{H_1} = 1 - \frac{F_1 \cdot \bar{\tau}_1}{T_3} \quad (8.4)$$

$$K_{H_2} = 1 - \frac{F_2 \cdot \bar{\tau}_2}{T_3} \quad (8.5)$$

де K_{H_1} та K_{H_2} – коефіцієнти наладопридатності 1-го та 2-го видів.

Таким чином, коефіцієнт готовності визначають через коефіцієнти наладопридатності ТС таким чином:

$$K_r = K_{H_1} + K_{H_2} - 1. \quad (8.6)$$

8.2. Моделювання та дослідження надійності технологічних процесів

Технологічний процес (ТП) як складна технічна система покликаний здійснити перетворення заготовки у виріб із заданим рівнем якості й точності. Це перетворення здійснюють, як правило, в декілька етапів (операцій), які послідовно змінюють стан об'єкта обробки (заготовки), доводячи його до необхідного рівня якості.

Таким чином, при функціонуванні технологічних процесів слід моделювати стан об'єкта обробки, який змінюється, що відбиває той чи інший ступень впливу засобів виробництва, на кожному етапі (операції) перетворень його властивостей.

Як правило, це стосується моделювання об'єктів з невідомими причинно-наслідковими зв'язками поміж параметрами і описується статистичними моделями.

Структурні моделі й показники надійності ТП.

Розв'язання задач аналізу та прогнозування якості технологічних процесів слід здійснювати на підставі структурних моделей, що повинні відбивати послідовність виконання окремих етапів ТП, їх взаємний вплив та нести інформацію про характеристики окремих етапів. Якість функціонування ТП характеризується багатьма факторами, наприклад, продуктивністю, затратами ресурсів тощо, однак якщо розглядати ТП як складну технічну систему, то одним з основних показників її якості є надійність, яка відбиває динаміку зміни будь-якого параметра ТП за часом.

У зв'язку з цим розробка структурних моделей, що дозволяють здійснити розрахунок надійності ТП, становить особливий інтерес.

Технологічний процес звичайно являє собою послідовність етапів обробки (чорнова, напівчиста, чистова тощо), на яких поступово відбувається поліпшення якості заготовки. При цьому на перший погляд може видатися, що структура технологічного процесу є послідовним з'єднанням елементів, але це не так, тому що при такому поєднанні з виходом із працездатного стану хоча б одного елемента відмовляє вся система, але в даному випадку цього не відбувається, так як наступні етапи технологічного процесу можуть виправити відмову попереднього етапу і система виконає свою задачу. Ця властивість технологічного процесу передбачає наявність резервування в структурній схемі, однак жодному з відомих видів резервування зберегти цю властивість технологічного процесу не

можна, так як у даному випадку якщо не відбулася відмова i -го елемента, $(i+1)$ -й елемент працює зі своїм навантаженням, а якщо відмова відбулася, то $(i+1)$ -й елемент змінює своє навантаження відмови i -го елемента й успішного виконання своєї задачі, при цьому він виступає як резервний. Традиційними методами подати структуру технологічного процесу, етапи якого з'єднані послідовно, разом з тим є резервними й можуть мати декілька станів залежно від того, наскільки повно виконали свою задачу попередні етапи, дуже важко.

Найбільш прийнятними в даному випадку є методи складання структурних моделей, що містять логічні елементи « I », аналіз надійності яких здійснюють за допомогою апарата алгебри логіки. Основна ідея методу міститься у заміні на певній стадії аналізу логічних змінних на імовірності того, що змінна набуває значення « I » або « 0 », та логічних операцій диз'юнкції, кон'юнкції та заперечення на арифметичні операції додавання, та віднімання. Для аналізу складної системи слід пов'язати її стан Y , що характеризує працездатність або непрацездатність системи, зі станом елементів x_1, x_2, \dots, x_n , які складають дану систему. Цю задачу розв'язують за допомогою функції алгебри логіки $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, яка за умови, що вона зв'язує стан елементів із станом системи, називається функцією працездатності системи.

Для оцінки працездатних станів системи використовують поняття [2, 4], і найкоротшого шляху успішного функціонування, який є такою кон'юнкцією її елементів, що жодного з компонентів якої не можна вилучити, не порушивши умови функціонування системи:

$$P_i = x_i, \quad (8.7)$$

де P_i – численність номерів, відповідних даному шляху.

Інакше кажучи, найкоротший шлях успішного функціонування описує один з можливих варіантів виконання задачі, яка стоїть перед системою, за допомогою мінімального набору працездатних елементів, потрібних для здійснення даного варіанта роботи системи. Після складання функції працездатності системи слід перейти до імовірнісної функції, за допомогою якої визначають показники надійності, що безпосередньо, як правило, здійснити неможливо, так як одна й та сама змінна може входити до складу декількох кон'юнкцій. Тому одержаний вираз одним з відомих способів [2] слід перетворити до безповторної форми функції алгебри логіки, в якій саме й здійснюється заміна логічних змінних та функцій на імовірнісні, за допомогою яких обчислюють показники надійності.

Таким чином, структура технологічного процесу (схема, цикл, режими), яка впливає на характер зносу шліфувального круга, викликає до життя певну схему виникнення параметричних відмов, конкретний закон розподілу наробки до відмови, що визначає рівень надійності ТС.

Методика побудови структурних моделей ТП.

Структурна схема технологічного процесу, що складається з декількох послідовних етапів, є набором шляхів (P_1, P_2, \dots, P_i), до яких входять етапи технологічного процесу в різних станах ($x_1, x_2, x_2^1, \dots, x_n$), залежно від наявності або відсутності відмов попередніх етапів технологічного процесу. При цьому вид структурної схеми залежить від того, які з етапів технологічного процесу мають «виправну» здатність, тобто можуть змінювати свою характеристику залежно від того, відбувалася відмова під час виконання попередніх етапів, чи ні, а також яким чином відбувається «виправлення» цієї відмови, а саме, якщо відмовив елемент x_i , то в зв'язку з цим змінюється характеристика тільки на наступному етапі, або на всіх етапах (x_{i+1}, \dots, x_n) технологічного процесу.

Зобразимо структурну схему (рис. 8.1, а) технологічного процесу, що складається з трьох етапів, причому 2-й та 3-й етапи мають «виправну» здатність і відмову i -го елемента «виправляє» тільки $(i+1)$ -й, назовемо цей вид виправлення відмов послідовним.

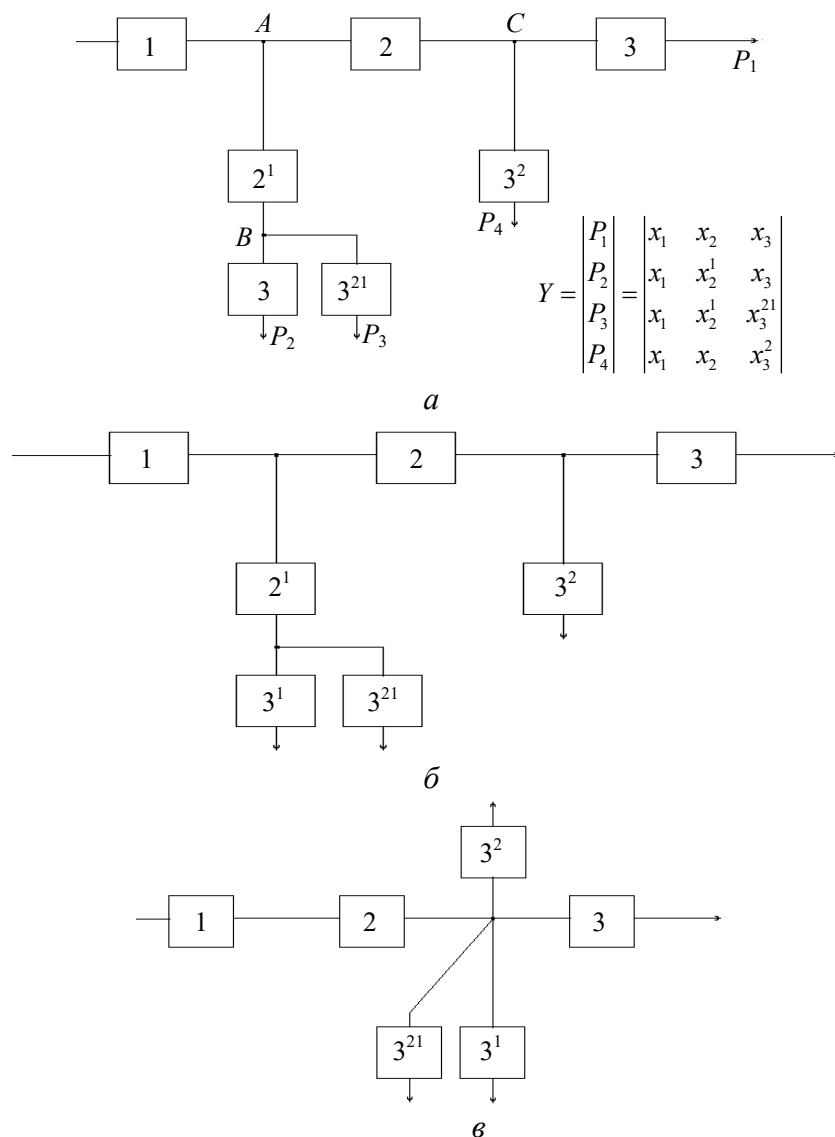


Рис. 8.1. Структурні схеми технологічного процесу (з трьох етапів): *a* – виправлення послідовне, виправні етапи 2, 3; *б* – виправлення одночасне, випрані етапи 2, 3; *в* – виправний етап 3

На рисунку 8.1, *a* під індексом 2^1 зображено 2-й етап технологічного процесу зі зміненою характеристикою в зв'язку з відмовою 1-го етапу, під індексом 3^{2^1} – третій етап зі зміненою характеристикою в зв'язку з відмовою етапу 2^1 , 3^2 – третій етап при відмові другого етапу. Вузли розгалуження *A*, *B*, *C* на схемі відповідають логічній функції або та відбивають можливість етапу працювати в нормальному режимі 2, 3 при безвідмовному виконанні попередніх етапів або режимі зі зміненою характеристикою 2^1 , 3^2 , 3^{2^1} під час відмови попередніх етапів.

Використовуючи апарат алгебри логіки, функцію працездатності такого технологічного процесу можна подати в такому вигляді [2, 4]:

$$y_a = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1 & x_2^1 & x_3 \\ x_1 & x_2^1 & x_3^{2^1} \\ x_1 & x_2 & x_3^2 \end{pmatrix}, \quad (8.8)$$

де $P_1 \dots P_4$ – найкоротші шляхи функціонування технологічного процесу;
 $x_1 \dots x_3^2$ – позначення різних етапів даного технологічного процесу, що входять у найкоротші шляхи $P_1 \dots P_4$.

Якщо етапи 2 та 3 технологічного процесу мають виправну здатність і при цьому в зв'язку з відмовою 1-го етапу одночасно коректується характеристика 2-го та 3-го етапів (назвемо цей вид «виправлення» етапів одночасним), то структурна схема такого технологічного процесу, зображена на рис. 8.1, б, відрізняється від структурної схеми рис. 8.1, а числом можливих станів третього етапу (в першому випадку це 3, 3^2 та 3^{21} , а в другому – 3, 3^1 , 3^2 , 3^{21}), що природно змінює надійність ТС процесу.

Зміна виду виправлення відмови відіб'ється також на рівнянні функції працездатності:

$$y_a = \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1 & x_2^1 & x_3^1 \\ x_1 & x_2^1 & x_3^{21} \\ x_1 & x_2 & x_3^2 \end{vmatrix}. \quad (8.9)$$

Випадок, коли лише один, третій етап буде виправним, подано на рис. 8.1, в. Функція працездатності технологічного процесу в цьому випадку набере вигляду:

$$y_a = \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1 & x_2^1 & x_3^1 \\ x_1 & x_2 & x_3^2 \\ x_1 & x_2 & x_3^{21} \end{vmatrix}. \quad (8.10)$$

Структурні схеми технологічних процесів, зображені на рисунку 8.1 (а, б, в) можна подати в більш компактній формі, як на рисунку 8.1 (а, б, в). Моделі технологічних процесів відповідають ієрархічним структурам типу «дерево», кількість рівнів яких співпадає з кількістю послідовних етапів технологічного процесу, а кількість елементів у одному ієрархічному рівні – з кількістю можливих станів кожного етапу. Аналізуючи структурні схеми, зображені на рисунку 8.2, а також ряд структурних схем, відповідних до реально функціонуючих процесів, можна визначити правила складання структурних схем технологічних процесів, що дозволяють формалізувати та автоматизувати роботу за допомогою ЕОМ.

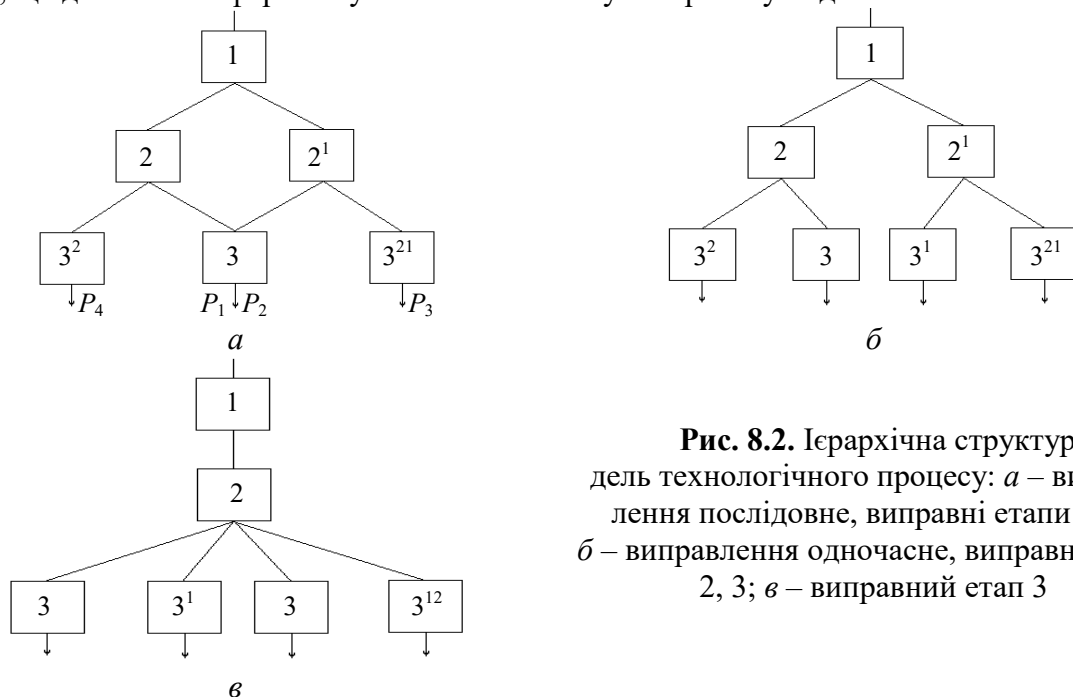


Рис. 8.2. Ієрархічна структурна модель технологічного процесу: а – виправлення послідовне, виправні етапи 2, 3; б – виправлення одночасне, виправні етапи 2, 3; в – виправний етап 3

Лекція 9. НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

9.1. Визначення надійності ТП за структурними моделями

Методи розрахунку інтервальної надійності ТС залежать від проміжку часу функціонування систем. Розглянемо методи визначення інтервальної надійності ТС процесів за час поміж підналагодженнями (правка круга) та за час обробки певної партії деталей. Розрахунок показників надійності виконують на основі структурного уявлення про ТС процесів шліфування.

Розрахунок структурної надійності ТС процесу здійснюють за допомогою табличного методу [20], вживаного для невеликого числа етапів (до 20) технологічного процесу. Цей метод ґрунтується на використанні теореми додавання ймовірностей сумісних подій, у якості яких тут виступають елементарні кон'юнкції умов працездатності системи, записаних у диз'юнктивній нормальній формі за допомогою найкоротших шляхів успішного функціонування:

$$y(x_1 \dots x_n) = \bigvee_{l=1}^d P_l. \quad (9.1)$$

Згідно з цією теоремою, а також використовуючи (9.1), імовірність безвідмовної роботи системи можна обчислити за формулою (2, 4):

$$\begin{aligned} P\{y(x_1 \dots x_n = 1)\} = P_c = P\left\{\bigvee_{l=1}^d P_l\right\} = \\ = \sum_i P(P_i) - \sum_j \sum_i P(P_i \wedge P_j) + \sum \sum \sum P(P_i \wedge P_j \wedge P_k) - \dots \\ \dots + (-1)^{d-1} P(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_d), \end{aligned} \quad (9.2)$$

де P_i – це i -кон'юнкція, що входить у (9.1).

Розрахунки за (9.2) виконують табличним способом. Слід скласти спеціальну таблицю, у якій число рядків n дорівнює числу елементів у структурній схемі, в кожному рядку записують надійність відповідного елемента, а число стовбців дорівнює числу всіх сполучень без повторень кон'юнкцій P_i , узятих по одній, по дві, по три і т.п. Крім того, вказують знаки імовірностей цих кон'юнкцій («+» або «-»), що чергуються, згідно з (9.2).

Складається таблиця, яка заповнюється хрестиками, якими позначають ті елементи, які входять у дану кон'юнкцію (табл. 9.1) для структурної схеми (див. рисунок 8.1, а).

Таблиця 9.1

Таблиця елементів, які входять до кон'юнкції

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1P_2	P_1P_3	P_1P_4	P_2P_3	P_3P_4	$P_1P_2P_3$	$P_1P_2P_4$	$P_1P_3P_4$	$P_2P_3P_4$	$P_1P_2P_3P_4$
	«+»				«-»					«+»				«-»
R_1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
R_2	×			×	×	×	×		×	×	×	×	×	×
R_3	×	×			×	×	×	×		×	×	×	×	×
R_2'		×	×		×	×		×	×	×	×	×	×	×
R_3^2				×			×		×		×	×	×	×
$R_3^{2'}$			×			×		×	×	×		×	×	×
RC	0,729	0,729	0,729	0,729	0,656	0,59	0,656	0,656	0,593	0,59	0,59	0,531	0,531	0,531
	2,916				3,148					2,242				0,531

Зміна навантаження етапів технологічного процесу тягне за собою зміну їх надійності, що можна виразити в загальному вигляді таким рівнянням:

$$P = P_H \left(\frac{t'}{t_H} \right)^m, \quad (9.3)$$

де P_H – надійність етапу технологічного процесу, що працює з номінальним навантаженням t_H ;

P' – надійність етапу технологічного процесу, що працює із змінним навантаженням t' ;

m – коефіцієнт.

Рівняння (9.3) дозволяє розраховувати структурну надійність технологічних процесів в умовах обмеженого об'єму вихідної інформації, що характерне для етапів конструкторської та технологічної підготовки виробництва, коли на підставі попереднього досвіду або обмежених випробувань відомий зв'язок параметричної надійності P з режимами обробки, які є характеристиками технологічного процесу.

9.2. Визначення надійності ТП обробці партії деталей

Для розв'язання задачі визначення надійності при обробці партії деталей уявимо, що круг складається з n робочих концентричних шарів. Товщину кожного шару визначають кількість витраченого між правками абразиву (включаючи й шар, який видаляють при правці). В даний момент часу працює тільки верхній робочий шар. Правка круга забезпечує зняття верхнього шару і вводить у роботу новий різальний шар, що лежить безпосередньо під верхнім – робочим; це дозволяє уявити роботу круга з позицій теорії надійності як «система з навантаженим резервом» (якими є підповерхневі шари).

Розглянемо в шліфувальному кругу два верхніх робочих шари. Можливі способи забезпечення безвідмовної роботи круга, що складається з двох робочих шарів, до моменту часу t показані на рис. 9.1, де A_1 – подія, що полягає в безвідмовній роботі верхнього шару за час t ; A_2 – подія, яка полягає в безвідмовній роботі другого (підповерхневого) шару за час $t \dots t_1$, тобто після відмови верхнього робочого шару. Визначимо імовірність події, що відповідає безвідмовній роботі розглядуваної двошарової системи $P_c^2(t)$ за час t :

$$P_c^2(t) = P \left[(t_1 > t) \vee (t_1 \leq t \wedge t_2 > t - t_1) \right]. \quad (9.4)$$

Так як події A_1 та A_2 є несумісними, то

$$P_c^2(t) = P(t_1 > t) + P(t_1 \leq t \wedge t_2 > t - t_1). \quad (9.5)$$

Звідси випливає

$$P_c^2(t) = P_1(t) + \int_0^t f_1(t_1) P_2(t - t_1) dt_1, \quad (9.6)$$

де $P_1(t)$ – імовірність безвідмовної роботи верхнього шару за час t ;

$f_1(t_1)$ – щільність розподілу наробки верхнього шару до відмови за час t_1 ;

$P_2(t - t_1)$ – імовірність безвідмовної роботи другого шару за час $(t - t_1)$.

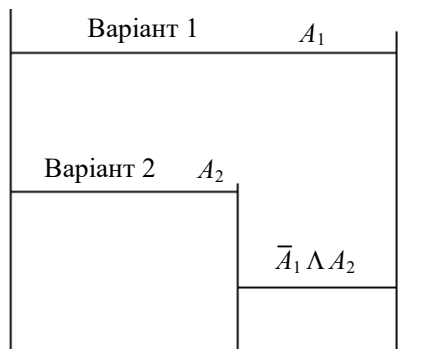


Рис. 9.1. Варіанти забезпечення безвідмовної роботи системи з двох елементів

При заданій щільності розподілу наробки шару шліфувального круга до відмови рівняння (9.6) визначає імовірність безвідмовної системи з навантаженим резервом.

Процес зносу шліфувального круга є доволі типовим для процесів, і часто закон розподілу його наробки до відмови близький до експоненціального, тобто коефіцієнти варіації цих розподілів σ^2/T^2 близькі до одиниці. Це дає можливість дістати часткове розв'язання для випадку, коли інтенсивність відмов λ робочого шару буде постійною:

$$P_c^2(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t) \quad (9.7)$$

Для системи, яка складається з n робочих шарів, імовірність безвідмовної роботи становитиме:

$$P_c^n(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}, \quad (9.8)$$

де λ – інтенсивність відмов кожного робочого шару;
 n – кількість правок круга за час t .

Рівняння (9.8) справедливе для випадку, коли надійність правки дорівнює одиниці. Це означає:

1 – правку круга виконують саме у той момент, коли круг втрачає свої різальні властивості, тобто коли відбувається відмова верхнього робочого шару;

2 – у процесі правки повністю поновлюються різальні властивості шліфувального круга. Однак ці умови виконуються не завжди, тому при визначенні імовірності безвідмовної роботи шліфувального круга слід урахувувати надійність правки ρ_s . Ураховуючи таке, рівняння (9.8) набере вигляду:

$$P_c^n(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t \rho_s)^i}{i!}. \quad (9.9)$$

Рівняння (9.9) визначає надійність шліфувального круга, що працює в рамках конкретного технологічного процесу, причому зміна останнього змінює рівень інтенсивності відмов – робочих шарів, що впливають на величину надійності шліфувального круга. Використовуючи дане співвідношення (9.9), можна визначити також потрібне число правок шліфувального круга i за час для підтримки заданого рівня надійності технологічної системи при шліфуванні.

Одержане рівняння дає можливість визначити коефіцієнт готовності технологічної системи. Так, підставляючи в рівняннях (9.5) і (9.6) $F = I - P_c^n$, можна дістати вирази, що визначають коефіцієнти наладопридатності першого, другого роду:

$$K_{H_1} = 1 - \frac{\tau_1}{T_0} (1 - P_c^n) = 1 - \frac{\tau_1}{T_0} \left[1 - e^{-\lambda T_0} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\lambda T_0 P_s)^i}{i!} \right] \quad (9.10)$$

Для визначення коефіцієнта наладопридатності другого роду K_{H_2} K_{H_2} припустимо, що зміну круга слід робити після відмови i -го робочого шару, імовірність безвідмовної роботи якого [29]:

$$P_i = e^{-\lambda T_0} \frac{(\lambda T_0)^i}{i!} \quad (9.11)$$

Тоді коефіцієнт:

$$K_{H_2} = 1 - \frac{\tau_2}{T_0} + \frac{\tau_2}{T_0} e^{-\lambda T_0} \frac{(\lambda_0 T_0)^i}{i!} \quad (9.12)$$

Таким чином, використання структурного методу дозволяє прогнозувати та розраховувати інтервальну надійність технологічних систем як поміж підналагодженнями (правка круга), так і під час обробки партії деталей.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Сполученням яких властивостей можна цілком охарактеризувати надійність? Дайте визначення цих властивостей і приклади.
2. Дайте визначення таких понять:
 - працездатний стан;
 - граничний стан;
 - відмова;
 - напрацювання до відмови;
 - напрацювання між відмовами;
 - термін служби.
3. У чому відмінність із погляду надійності послідовного і рівноважного з'єднання елементів? Захисні умови працездатності.
4. У чому суть резервування? Наведіть класифікацію видів резервування.
5. Наведіть класифікацію відмов та їх причин.
6. Перерахуйте основні характеристики безвідмовності відновних і невідновних об'єктів.
7. Перерахуйте і дайте визначення основних показників довговічності.
8. Перерахуйте і дайте визначення основних показників ремонтпридатності.
9. Перерахуйте і дайте визначення основних показників збереження.
10. Перерахуйте і дайте визначення основних комплексних показників надійності.
11. Охарактеризуйте показовий розподіл і визначте область його застосування. Наведіть рівняння розрахунку основних показників надійності та графіки зміни цих показників за часом.
12. Охарактеризуйте нормальний розподіл і визначте область його застосування. Наведіть рівняння розрахунку основних показників надійності та графіки зміни цих показників за часом.
13. Охарактеризуйте розподіл Вейбула і визначте область його застосування. Наведіть рівняння розрахунку основних показників надійності та графіки зміни цих показників за часом.
14. Дати визначення і пояснити терміни: випадкова функція, випадковий процес.
15. Навести класифікацію випадкових процесів.
16. Дати пояснення поняттю «стаціонарний випадковий процес».
17. Навести схему послідовного з'єднання елементів і рівняння розрахунку надійності системи та приклади таких систем.
18. Навести схему паралельного з'єднання елементів і рівняння розрахунку надійності системи та приклади таких систем.
19. Дати визначення надійності ТС. Які види процесів діють у рамках ТС.
20. Навести структурні моделі надійності ТП, які складаються з трьох етапів.
21. Використовуючи табличний метод, пояснити методику розрахунку надійності ТП за її структурною моделлю.

1. Оборський Г.О. Надійність технічних систем : конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Г.О. Оборський – Одеса: Державний університет «Одеська політехніка», 2021 – 63 с.
2. Оборський Г.О. Надійність технічних систем та обладнання : підручник / Г.О. Оборський – Одеса: Бахва, 2013. – 360 с.
3. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни «Надійність технічних систем та приладів» для студентів заочної форми навчання за спеціальністю 7.0991302 (8.091302) – Метрологія та вимірювальна техніка / Укл. Оборський Г.О. – Одеса: ОДПУ, 2001. – 13 с.
4. Оборський Г.О. Моделювання та забезпечення надійності технологічних систем і технологічних процесів. Навчальний посібник. Одеса, 1997. – 137 с.
5. Канарчук В.Є. Надійність машин : підручник / В.Є. Канарчук, С.К. Полянський, М.М. Дмитрієв. – К.: Либідь, 2003. – 424 с.
6. Надійність сільськогосподарської техніки : підручник / М.І. Черкун, В.В. Аулін та ін.; За заг. Ред.. М.І. Черновола. – Кіровоград: ТОВ «КОД», 2010. – 320 с.
7. Зенкін М.А. Методи підвищення надійності та довговічності деталей та вузлів машин легкої промисловості : підручник / М.А. Зенкін, Б.Ф. Піпа. – К.: КНУДТД, 2004. . – 264 с.
8. Дзюба Л. Основи надійності машин / Л. Дзюба, Ю. Зима, Ю. Лютий. – Львів: Логос, 2003. – 201 с.
9. Надійність техніки. Системи технологічній Терміни та визначення: ДСТУ 2470-94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 28 с.
10. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними: ДСТУ 3004-95. К.: Держстандарт України, 1995. – 51 с.
11. Болтянська Н.І. Надійність технологічних систем ; курс лекцій / Н.І. Болтянська. – Мелітополь: Люкс, 2019. – 168 с.