

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

**з навчальної дисципліни «Надійність авіаційної техніки»
обов'язкових компонент освітньо-професійної програми
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти**

Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів

за темою – Основні поняття та визначення.

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу Харківського наці-
онального університету внутрішніх
справ
Протокол від 22.09.2021 № 2

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 30.08.2021 № 1

Розробник: старший викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист, Владов С.І.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук, доцент Павленко О.В.
2. Викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Тягній В.Г.

План лекції

1. Предмет і завдання теорії надійності.
2. Критерії та показники надійності невідновлюваних об'єктів.
3. Критерії та показники надійності відновлюваних об'єктів.

Рекомендована література:

Основна

1. Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 240 с.
2. Міляєв Ю. П., Нечипоренко О. М. Основи надійності технічних систем : навчальний посібник. Київ : Видавн.-полігр. центр Акад. муніцип. управління, 2008. 246 с.
3. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин : підручник. Київ : Либідь, 2003. 424 с.

Допоміжна

4. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. Київ : Держстандарт України, 1995. 37 с.
5. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1995. 30 с.
6. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Київ : Держстандарт України, 1995. 123 с.
7. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Київ : Держстандарт України, 1998. 42 с.
8. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. Київ : Держстандарт України, 1999. 21 с.
9. ДСТУ 3942-2000. Надійність техніки. Плани випробувань для контролю середнього наробітку до відмови (на відмову). Київ : Держстандарт України, 2000. 30 с.

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ

Проблема забезпечення надійності – одна з нагальних під час проектування, виробництва та експлуатації ЛА (літаків, вертольотів, супутників, ракет тощо). Надійність авіаційної й космічної техніки – найважливіший елемент її якості: без високої надійності не може бути виробів високої якості. Роль проблеми забезпечення надійності сучасних ЛА зростає через безупинне їх ускладнення, постійне збільшення навантажень та інтенсивності використання, значне розширення діапазону умов експлуатації й галузей застосування, підвищення рівня автоматизації ЛА.

Як і багато інших технічних об'єктів, ЛА складаються із складних систем та комплексів технічних засобів, тому багато питань теорії і практики надійності ЛА можуть розглядатися як *загальнотехнічні*. Разом з тим специфіка ЛА потребує у деяких випадках особливого підходу і спеціальних методів аналізу й підвищення надійності.

До особливостей ЛА варто віднести насамперед те, що вони є *складними* технічними об'єктами, які функціонально об'єднують елементи і складні системи, які оснащені різноманітними апаратними та програмними засобами й утворюють апаратно-програмні комплекси (АПК). Сучасні АПК – це сукупність технічних засобів, алгоритмів керування, методів і засобів інформаційного й програмного забезпечення, об'єднаних для виконання завдань функціонування. У свою чергу, технічні засоби містять у собі крім пристроїв, механізмів, приладів та будь-яких їх елементів і частин, складні комплекси вимірювальної, інформаційно-обчислювальної техніки, засобів зв'язку, автоматики, відображення, реєстрації й архівації інформації, допоміжної та основної апаратури, котрі забезпечують їх функціонування.

Безумовно, не всі відмови апаратури неминучі, кожна з них зумовлена своєю причиною чи групою причин. Якщо причини відомі, на них можна впливати для попередження відмови. Але основною

особливістю ЛА є те, що відомостей про процеси, які відбуваються в них, не завжди виявляється достатньо. Щоб такі відомості отримати, систематизувати і врахувати під час проектування і виробництва, потрібні чималий час і чималі засоби, яких у розробників часто немає. Наслідком цього є *непрогнозованість* деяких аварійних ситуацій, *випадковий* характер появи відмов в апаратурі ЛА.

Багато технічних об'єктів старіють морально раніше, ніж фізично, тому найчастіше проектувальники замість удосконалення вже створених елементів і систем розробляють нові. Виходячи з досвіду попередньої роботи, вони виключають одні помилки, але замість них з'являються інші, викликані розходженням теорії і практики, недостатнім врахуванням умов експлуатації. Особливістю авіаційної та космічної техніки можна вважати значне *розширення діапазону умов експлуатації* ЛА. Залежно від призначення, території застосування і пори року вони працюють в умовах високої чи низької температури навколишнього середовища, зазнають дії підвищеного чи зниженого тиску, високої чи низької вологості, великих механічних навантажень вібраційного й ударного типів, на них впливають підвищена радіація, агресивні середовища, негативні біологічні фактори.

Ненадійність авіаційної та космічної техніки обертається великими *економічними втратами*. Вартість експлуатації багатьох ЛА перевищує їх покупну вартість. ***Проблема надійності ЛА має особливе значення через значущість виконуваних ними функцій і високу ціну відмови:*** навіть у досить рідкісних випадках раптова відмова одного з основних елементів або систем ЛА у повітряному просторі може спричинити *загибель людей і становить серйозну екологічну небезпеку для навколишнього середовища*. Крім того, підвищення надійності ЛА має економічні аспекти: збитки, спричинені відмовою елемента або системи ЛА чи їх неправильним спрацюванням, часто перевищують вигоду, яку отримують у періоди їх працездатного стану. Наприклад, збиток,

викликаний падінням ЛА, може в сотні й тисячі разів перевищити вартість самого ЛА і вимірюватись у мільйонах доларів.

Особливістю ЛА є також те, що не всі відмови елементів і систем проявляються явно і часто не можуть бути виявлені візуально. Щоб відстежувати такі відмови, створюють спеціальні *засоби контролю і діагностування*, які дають можливість вчасно передбачити виникнення тих відмов, які випадково проявляються, і, як наслідок, запобігти їх появі, що значно підвищує рівень надійності ЛА. Для того, щоб технічні засоби відтворювали алгоритми функціонування так, як це було передбачено розробниками під час проектування, апаратура має бути досить надійною, пристосованою для своєчасного виявлення й усунення відмов. Від того, наскільки в ЛА вдалося виключити відмови або зменшити їх кількість та ймовірність появи чи усунути або зменшити їх вплив на процес функціонування ЛА, залежить не тільки їх якість, але й безпека експлуатації. Це може бути гарантовано *системою забезпечення надійності* ЛА, яка має попереджати й усувати аварійні ситуації і сама не повинна провокувати негативні процеси в технічних системах та комплексах ЛА. Тому завдання *розроблення та впровадження системи забезпечення високої надійності* стає ключовим у теорії і практиці проектування, виробництва й експлуатації ЛА.

Основні терміни та визначення, обсяг і зміст основних понять, використовувані у цьому навчальному посібнику, регламентовані ДСТУ 2860–94 Надійність техніки. Терміни та визначення.

Але, що стосується російського математичного терміна «плотность», який в ДСТУ 2860-94 перекладено як «густина», у цьому навчальному посібнику використано термін «щільність» з декількох причин:

- термін «густина» в ДСТУ 2860–94 не належить до стандартизованих термінів та їх синонімів, тобто не є для теорії надійності основним і визначальним;

– термін «щільність» використовується в російсько-українських словниках [39; 40];

– ДСТУ 2860–94 було затверджено понад 16 років тому, тобто деякі визначення застаріли і потребують уточнення у словниках, виданих пізніше.

1.1. Предмет і завдання теорії надійності

Теорія надійності – наукова дисципліна, що вивчає методи забезпечення ефективної роботи технічних об’єктів у процесі їх життєвого циклу. Роль та завдання теорії надійності – встановити і стандартизувати показники надійності, обґрунтувати вимоги до надійності, розробити методи аналізу та забезпечення заданих вимог під час проектування, виробництва та експлуатації об’єктів.

Наука про надійність техніки вивчає закономірності змінювання показників працездатності об’єктів з часом, а також фізичну природу відмов, і на цій основі розробляє методи, що забезпечують потрібну довговічність та безвідмовність роботи об’єктів з найменшими витратами часу й коштів або дають можливість покращити ці показники.

Предмет дослідження теорії надійності як наукової дисципліни має різні аспекти. У *технічному аспекті* теорія надійності встановлює закономірності виникнення відмов і відновлень працездатності об’єктів, розглядає вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на процеси, що відбуваються у виробі, створює методи розрахунку надійності й прогнозування відмов, знаходить способи підвищення надійності під час проектування і виготовлення об’єктів, а також способи збереження надійності у процесі експлуатації, визначає методику збирання, обліку та аналізу статистичних даних, які характеризують надійність, розробляє методи проведення випробувань на надійність, оброблення та оцінювання результатів випробувань.

В економічному аспекті всі заходи щодо підвищення надійності на всіх етапах функціонування об'єкта повинні забезпечувати *максимальний економічний ефект* або задану надійність з *мінімальними витратами*. Для досягнення цього теорія надійності встановлює зв'язок між кількісними показниками надійності та економічною ефективністю, розробляє методи встановлення оптимальних значень показників надійності і вибору оптимальних конструктивних рішень, режимів експлуатації, технічного обслуговування й ремонту. При цьому слід враховувати, що підвищення надійності ЛА вимагає певних коштів, а випуск ненадійних виробів може спричинити непродуктивні витрати трудових і матеріальних ресурсів у процесі експлуатації. Вирішення проблем надійності – це значний резерв підвищення *ефективності виробництва*.

Вплив надійності авіаційної техніки на безпеку польотів відображає *соціальні* аспекти теорії надійності. Кожна авіакатастрофа або вимушене простоювання ЛА внаслідок пошкодження окремих елементів чи систем, або зниження їх технічних характеристик нижче від допустимого рівня зазвичай спричиняють величезні матеріальні збитки, часто мають катастрофічні наслідки.

В *організаційному* аспекті мають бути якнайкраще організовані трудові процеси, що забезпечують якісне (безпомилкове) виконання робіт під час проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів, служб надійності, науково-дослідних робіт, технічного контролю і навчання фахівців. Важливість цього аспекту пов'язана також із тим, що всі завдання підвищення і забезпечення надійності вирішуються ергономічними системами («людина–літальний апарат–середовище»), а значна частка льотних подій пов'язана із впливом людського чинника.

У *правовому* аспекті слід проводити роботи зі **стандартизації та уніфікації** у сфері надійності на основі створення комплексу загальних технічних стандартів у авіаційній галузі, які повинні забезпечувати

порозуміння фахівців, порівнянність (зіставність) результатів розрахунків і випробувань, впровадження сучасних концепцій забезпечення надійності та регламентації норм надійності у стандартах і технічних умовах на конкретні види техніки.

Головні завдання теорії надійності:

- встановлення показників надійності технічних об'єктів;
- розроблення аналітичних методів оцінювання надійності;
- спрощення аналізу та оцінювання надійності;
- оптимізація показників надійності на стадії експлуатації технічних об'єктів;
- розроблення методів підвищення надійності і синтезу високонадійних об'єктів.

Надійність – фундаментальне поняття, за допомогою якого визначаються інші поняття теорії надійності.

Надійність – це *якісна* властивість об'єкта зберігати у часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати потрібні функції у заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування [5]. Це поняття має деякі особливості.

1. Як випливає з визначення, надійність є *внутрішньою* властивістю об'єкта, що закладена в нього під час проектування та виготовлення і яка виявляється під час експлуатації. Для *кількісного* оцінювання надійності, як і будь-якої іншої властивості об'єкта, необхідна та чи інша міра, що є її характеристикою. Надійність не можна звести тільки до однієї її характеристики.

2. Надійність – це *комплексна* властивість, яка, залежно від призначення об'єкта та умов його застосування, може виявлятися у безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збережуваності чи у

певних поєднаннях цих властивостей. Термін «надійність» використовують лише для загального *якісного (некількісного)* опису; для *кількісного* визначення надійності використовують кількісні показники цих властивостей.

3. Особливість надійності полягає в тому, що вона виявляється у *часі*. Якщо немає достатньо тривалого спостереження за об'єктом у часі, не можна зробити ніяких висновків про його надійність. Цим вона істотно відрізняється від таких властивостей об'єкта, як дефектність, точність та ін. *Дефектність* можна встановити з допомогою спеціальних вимірів протягом порівняно невеликого часу, обумовленого кількістю вимірюваних параметрів і часом кожного виміру, за кілька хвилин чи годин [3; 15] *до початку* експлуатації. Для того, щоб скласти уявлення про надійність, потрібні спостереження за групою однотипних об'єктів протягом тисяч чи десятків тисяч годин. Можна вважати також, що дефектність і точність відображають *початкове* значення якості об'єкта, а надійність відображає *стійкість початкової якості у часі*.

4. Ще одна особливість надійності полягає у тому, що вона по-різному виявляється за різних умов експлуатації і режимів застосування об'єкта. Зі зміною режимів та умов експлуатації змінюються також характеристики надійності. Не можна оцінити надійність об'єкта, якщо не уточнені *умови його експлуатації і режими застосування*.

1.1.1. Об'єкт, система та елемент

У визначенні поняття «надійність» для позначення власника цієї властивості і предмета аналізу використовують поняття «об'єкт».

Об'єкт – це технічний предмет певного цільового призначення, який розглядають як сукупне ціле і надійність якого аналізують у періоди проектування, виробництва, випробувань та експлуатації.

Примітка 1. Об'єкт може включати технічні засоби, технічний персонал чи будь-яке їх поєднання.

Примітка 2. Сукупність об'єктів, об'єднаних спільним призначенням і метою функціонування, можна розглядати як об'єкт.

Об'єктом може бути система або елемент (споруда, технічна система, технічний чи програмний засіб або комплекс, машина, людино-машинна система, підсистема, установка, апаратура, прилад, агрегат, пристрій чи будь-яка їх частина, окрема деталь або функціональна одиниця тощо), який можна розглядати як самостійну одиницю і надійність якого аналізують у кожному конкретному випадку на етапах розробки технічних вимог, проектування, конструювання, виробництва, використання і ремонту (рис. 1.1). До об'єктів належать також сукупності (комплекси, системи) виробів, що спільно виконують визначені функції чи завдання, навіть якщо вони не пов'язані між собою конструктивно (наприклад, лінії радіозв'язку, системи енергетики та ін.).

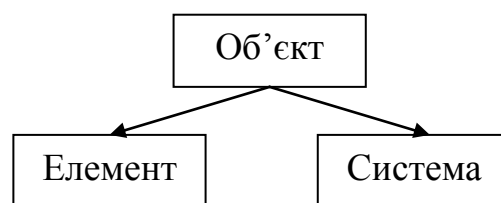


Рис. 1.1. Зв'язок між об'єктом, елементом і системою з погляду теорії надійності

Елемент з погляду надійності – найпростіша складова частина виробу; він може складатися з багатьох деталей.

Система – це сукупність спільно діючих елементів, вона призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Тобто, з погляду теорії надійності, під системою розуміють таку *сукупність взаємодіючих елементів*, яку не можна розглядати як сукупне ціле без врахування зв'язків між елементами. У цьому випадку розглядають показники надійності не тільки окремих елементів, які входять у склад цієї системи, а також вплив на надійність структурних та функціональних зв'язків між ними.

Поняття елемента і системи трансформуються залежно від поставленого завдання. Наприклад, двигун літака під час встановлення його власної надійності розглядають як систему, що складається з окремих елементів – механізмів, деталей і т. п., а під час вивчення та

аналізу надійності самого літака в цілому – як його елемент. Отже, залежно від етапу аналізу надійності та ступеня його деталізації той самий об'єкт можна розглядати і як елемент, і як систему.

У технічній літературі з надійності часто використовують також поняття «виріб». Однак поняття «об'єкт» і «виріб» не є синонімами і тому потребують пояснення. Виріб – це промислова продукція. В єдиній системі конструкторської документації виробом називають будь-який предмет чи набір предметів, що підлягають виготовленню на виробництві. До технічних об'єктів належать не будь-які промислові вироби, а тільки такі, кожен екземпляр з яких у процесі експлуатації (застосування за призначенням) не піддається поступовому витрачання, як, наприклад, паливо чи мастильні матеріали (у таких виробів з часом витрачається тільки технічний ресурс). З цього погляду не є об'єктом банка з мастильним матеріалом, хоча, безумовно, вона є виробом. Однак це не означає, що поняття «виріб» не можна вживати для аналізу надійності ЛА. Відтепер під виробом будемо розуміти будь-яку одиницю промислової продукції, кількість якої можна обчислювати у штуках чи екземплярах.

У технічній літературі з теорії надійності [3] терміни «система» і «елемент» з погляду аналізу надійності вживають у вузькому і широкому розуміннях (сенсах), що потребує окремого детального пояснення.

Елементом у вузькому розумінні називають виріб, що випускається серійно промисловістю і який має *самостійне конструктивне оформлення* (інтегральна мікросхема, тензорезистор, штуцер, штепсельний роз'єм тощо). Таке визначення цілком прийнятне і з погляду теорії надійності, і не суперечить тому, що такий елемент можна розглядати як об'єкт для аналізу його надійності.

Елементом у широкому розумінні, чи структурним елементом, називають будь-який об'єкт, внутрішня структура якого на цьому етапі аналізу надійності не враховується. *У розрахунках надійності такий*

елемент розглядають як єдине і неподільне ціле. У технічній кібернетиці є термін, близький за змістом до терміна «структурний елемент», а саме – «чорна шухляда». Під час побудови моделей надійності структурний елемент іноді називають ще елементом розрахунку надійності. Вживання терміна «елемент» (у широкому розумінні) стосовно технічного виробу зовсім не означає, що він простий і містить невелику кількість елементів у вузькому розумінні. Елементом у широкому розумінні може бути не тільки діод, мікросхема, але й логічна плата, системний блок комп'ютера, комп'ютер у цілому, обчислювальний комплекс.

Системою в широкому розумінні називають сукупність елементів (в широкому сенсі), з'єднаних між собою тим чи іншим способом. Натомість система в широкому розумінні не обов'язково повинна містити велику кількість апаратури. Вона може складатися з декількох чи навіть одного елемента у широкому розумінні. Так, резистор можна розглядати як систему, що складається з підкладки ізоляції, напилювання, електричних виводів і т. п. Надалі терміни «елемент» і «система» вживатимемо переважно в широкому розумінні, за винятком випадків, про які буде сказано окремо.

За ступенем складності системи можна розділити на прості і складні. Відмітні риси складної системи: велика кількість елементів, складний характер зв'язків між ними, різноманітність виконуваних функцій, зокрема обумовлених наявністю зворотних зв'язків, наявність елементів самоорганізації, складність поведінки під впливом зовнішніх факторів, що змінюються, участь оперативного персоналу у функціонуванні системи тощо. Залежно від факторів, що враховуються під час класифікації, розрізняють структурно складні, функціонально складні, організаційно складні та інші різновиди складних систем. Автоматизовані системи обробки інформації і керування ЛА належать, зазвичай, до складних систем, хоча багато їх підсистем є простими

системами. Багатофункціональні системи найчастіше мають кілька рівнів працездатності, складну структуру, елементи адаптивності та самоорганізації.

1.1.2. Працездатність. Справність. Відмова. Відновлення

Надійність об'єкта характеризується такими основними *станами* і *подіями*.

Справність – це стан об'єкта, за якого він здатний виконувати усі *задані* функції та відповідає всім вимогам, установленим конструкторською (проектною) і/або нормативно-технічною документацією (НТД).

Примітка. Далі під НТД будемо розуміти будь-яку конструкторську, проектну, технічну, ремонтну та іншу нормативну документацію.

Працездатність – це стан об'єкта, за якого він здатний виконувати усі *потрібні* функції, зберігаючи значення основних параметрів, установлених НТД.

Поняття **справність** ширше, ніж поняття **працездатність**. Працездатний об'єкт має задовольняти лише ті вимоги НТД, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. Отже, якщо об'єкт непрацездатний, то це свідчить про його несправність. Натомість якщо об'єкт несправний, то це не означає, що він непрацездатний. Наприклад: 1) пошкодження внутрішнього облаштування літака (поломане крісло для відпочинку персоналу або пасажира) – це його несправність, за якої літак може залишитися працездатним, тобто може виконувати такі важливі потрібні функції, як злітати, летіти по заданому маршруту, перевозити пасажирів або вантаж тощо; 2) розбитий габаритний ліхтар сигналізує робітнику ДАІ про несправність автомобіля і служить поважною причиною для стягнення штрафу з водія, але при цьому автомобіль залишається працездатним і може їхати.

Фактично одна з основних вимог теорії надійності – це необхідність установити приналежність усіх можливих станів об'єкта до одного з двох протилежних класів: *працездатні* і *непрацездатні*. **Непрацездатним** буде такий стан, за якого значення хоча б одного з параметрів потрібної функції не відповідає вимогам НТД. У більшості технічних об'єктів немає чіткої межі між цими класами станів. Однак у теорії надійності проміжні стани не розглядаються. Щоб оцінити надійність, треба зробити цю межу чіткою відповідно до розглянутої моделі надійності. Це дуже непросте завдання, і вирішують його шляхом обговорення за участю компетентних осіб з боку розробника і замовника (користувача) об'єкта.

Однак далеко не завжди завдання розбиття усіх станів за цим дуальним принципом може бути успішно вирішене, тоді вводять декілька рівнів працездатності і поняття *повної* і *часткової працездатності*. У багатофункціональних системах може виникнути ситуація, коли для кожної функції вдається розділити всі стани на працездатні і непрацездатні, але бувають стани, за яких одні функції виконуються, а інші – ні. Тоді рівні працездатності виділяють за здатністю виконувати усі функції, групу функцій або окремі визначені функції. Для оцінювання надійності таких об'єктів можна застосовувати векторні показники. Якщо це незручно, використовують згортку векторного показника у скалярний, що трактується як показник ефективності.

Працездатний стан об'єкта може бути *критичним*.

Критичний стан – це стан об'єкта, що може спричинити травмування або загибель людей, значні матеріальні збитки чи інші неприйнятні наслідки.

Примітка 1. Критичний стан не завжди є наслідком критичної несправності.

Примітка 2. Для конкретного об'єкта мають бути встановлені критерії критичного стану.

Наприклад, різке гальмування літака на критично підвищеній швидкості на злітно-посадковій смузі може призвести до недопустимого зношування чи обгорання покриттів коліс шасі, стан яких може бути критичним під час наступної посадки і надалі спричинити поломку шасі, аварію та загибель людей. Для деяких об'єктів критичний стан є певною фазою у їх експлуатаційному графіку, який вимагає проведення ремонтно-відновлюваних робіт.

Непрацездатний стан об'єкта може бути *граничним*.

Граничний стан – стан об'єкта, за якого його застосування (експлуатація) за призначенням неприпустиме або недоцільне, а відновлення його працездатного стану неможливе. Граничний стан часто виникає унаслідок старіння, зношування чи істотного зниження ефективності експлуатації об'єкта. Майже для всіх об'єктів граничний стан є останнім у функціонуванні, тобто об'єкт знімається з експлуатації. У загальному випадку критерії граничного стану об'єкта мають бути визначені або регламентовані НТД.

Застосування об'єкта за призначенням припиняється у таких випадках:

- непереборне порушення безпеки;
- неусувне відхилення значень параметрів від заданих величин;
- неприпустиме збільшення експлуатаційних витрат.

З переходом із працездатного стану в непрацездатний і назад пов'язані особливі події у процесі функціонування об'єкта, які відповідно називаються *відмовою* і *відновленням*.

Відмова – подія, що полягає у порушенні працездатного стану об'єкта, тобто подія, за якої відбувся перехід об'єкта з працездатного стану у непрацездатний.

Критерій відмови – відмітна (характерна) ознака або сукупність ознак, згідно з якими встановлюється факт виникнення відмови об'єкта, тобто ознака порушення працездатного стану, який встановлений у НТД.

Природно, що на противагу відмові, **відновлення** – це подія або процес, що полягає в переході об'єкта з непрацездатного стану у працездатний у результаті усунення відмови шляхом перебудови (реконфігурації) структури, ремонту або заміни частин та елементів, що відмовили.

У зв'язку з відмінністю у поняттях «справність» і «працездатність» треба пам'ятати, що будь-яка відмова пов'язана з порушеннями вимог документації. Але не кожне порушення вимог спричиняє відмову, часто таке порушення викликає подію, яку називають несправністю, але це не можна вважати виникненням непрацездатного стану. Тому розрізняють несправності, що не спричиняють відмови, і несправності та їх сполучення, що викликають відмову (втрату працездатності).

1.1.3. Характеристики і класифікація відмов

Характер виникнення відмови – це фізичний, хімічний або інший процес, що викликав відмову.

За *типом* відмови розділяють на такі:

– **відмови функціонування** (виконання основних функцій об'єктом припиняється; наприклад, поломка осі колес шасі літака, зубів шестірні тощо); це функціональна надійність;

– **відмови параметричні** (деякі параметри об'єкта змінюються у неприпустимих межах, наприклад, втрата міцності крила літака, точності приладу); це параметрична надійність.

Відмову можна класифікувати за різними ознаками [2; 3; 5].

Основні ознаки класифікації відмов:

- швидкість виникнення;
- причина виникнення;

- спосіб проявлення;
- характер усунення;
- наслідки відмов;
- можливість подальшого використання об'єкта;
- характер виявлення;
- час виникнення.

Розглянемо докладніше кожен із класифікаційних ознак.

За швидкістю виникнення [3] бувають:

– *раптова відмова* – відмова, що проявляється у різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкта;

– *поступова відмова* – відмова, що відбувається у результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта.

Примітка. Деякі автори [33] при класифікації вказаних відмов називають ознаку не «швидкість виникнення», а «характер виникнення», що робить означення суперечливим. По-перше, ці відмови належать до експлуатаційних, які можна визначати тільки у разі тривалих випробувань у часі. Тому ознака «швидкість» тут більш доречна. По-друге, під час застосування об'єкта за призначенням більш важливою і доцільною для таких відмов є ознака «можливість їх прогнозування». А для поступових відмов, які розрізняють за швидкістю їх виникнення, таке прогнозування можливе.

Раптові відмови найчастіше проявляються у вигляді механічних ушкоджень елементів (тріщини у разі крихкого руйнування, пробой ізоляції, обриви і т. п.) і не супроводжуються попередніми видимими ознаками їх наближення. Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною значень одного чи декількох параметрів об'єкта і незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи. Цю відмову неможливо передбачити попередніми дослідженнями або технічним оглядом.

Поступові відмови часто пов'язані зі зношуванням деталей і старінням матеріалів. Вони можуть залежати від тривалості експлуатації елемента або системи. Поступові зміни параметрів зазвичай легко простежуються, даючи можливість вчасно ужити заходів з попередження переходу об'єкта у непрацездатний стан.

За причиною виникнення виділяють:

- *конструкційну відмову*, викликану недоліками, недосконалістю і/або невдалою конструкцією об'єкта;
- *виробничу відмову*, пов'язану з помилками під час виготовлення об'єкта через недосконалість або порушення технології, невідповідність процесу виробництва установленим виробничим нормам і процесам, заданим у проекті;
- *експлуатаційну відмову*, викликану порушенням правил та умов експлуатації об'єкта, виникненням непередбачених зовнішніх впливів під час використання чи незапланованої високої інтенсивності застосування.

За способом проявлення відмови бувають:

- *випадкові*, обумовлені непередбачуваними подіями, наприклад, випадковими перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи керування і т. п.;
- *систематичні*, що виникають з поступовим нагромадженням ушкоджень і обумовлені закономірними та неминучими явищами: зношуванням, старінням, корозією, утомленістю і т. п. Можна простежити систему виникнення будь-якої систематичної відмови. Ця відмова однозначно пов'язана з певною причиною, яку можна усунути лише після модифікації проекту чи виробничого процесу, правил експлуатації, документації чи інших чинників, що можна врахувати, наприклад, підрегулюванням, налаштуванням тощо.

Примітка 1. Випадковими зазвичай бувають *раптові* відмови.

Примітка 2. Систематичними найчастіше бувають *поступові* відмови.

За характером усунення бувають:

– *стійкі відмови*, які неможливо усунути легким або швидким способом, для відновлення працездатності потрібен тривалий ремонт або заміна елементів, вузлів чи структури об'єкта;

– *самоусувні відмови* – легкі відмови, що легко усуваються. Самоусувні відмови можуть виникати багаторазово (виникаючі/зникаючі), тоді їх відносять до *повторюваних (перемежованих) відмов*. **Повторювана відмова** – це самоусувна відмова одного й того самого характеру, що виникає багаторазово. До самоусувних відмов належить *збій* або одноразова відмова. **Збій** – це одноразова відмова, яка сама зникає або яку незначним втручанням усуває оператор. Збій усувається в результаті природного повернення об'єкта у працездатний стан чи без участі, чи за нетривалої участі оператора, причому час усунення відмови малий або близький до нуля.

За наслідками виділяють:

– *важку відмову* (наслідки відмови: викликає вторинні відмови суміжних вузлів).

– *середню відмову* (наслідки відмови: не викликає відмови суміжних вузлів – тобто вторинних відмов);

– *легку відмову* (наслідки відмови: для відновлення працездатності не потребує тривалого ремонту або заміни елементів, вузлів чи структури об'єкта).

За можливістю подальшого використання об'єкта бувають:

– *повні відмови*, що виключають спроможність об'єкта функціонувати до їх усунення (об'єкт не виконує жодної з потрібних функцій);

– *часткові відмови*, за яких об'єкт можна частково використовувати (об'єкт може виконувати частину потрібних функцій).

За наявності декількох рівнів працездатності у багатofункціональній системі *повна відмова під час виконання однієї з функціонально самостійних операцій* може означати тільки *часткову*

відмову системи в цілому, якщо втрачена одна чи частина функцій, а інші можуть виконуватися.

За характером виявлення вирізняють:

- *явні (очевидні)* відмови – відмови, що виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностування під час підготовки об'єкта до використання чи у процесі його використання за призначенням;

- *неявні (приховані, латентні)* відмови – відмови, що не виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностики, але виявляються під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностики. Затримка у виявленні неявної відмови може спричинити некоректну обробку інформації, неправильне спрацьовування алгоритмів, вироблення помилкових керівних впливів та інших несприятливих наслідків.

За часом виникнення виділяють:

- відмови під час *приробітку*, що виникають у початковий період експлуатації;

- відмови під час *нормальної експлуатації*;

- *відмови від зношування*, викликані необоротними процесами зношування деталей, старіння матеріалів та ін., які виникають після довготривалого застосування.

Отже, будь-яку відмову можна характеризувати (описати) за кожною з наведених вище ознак. Наприклад: раптова експлуатаційна повторювана часткова явна відмова, яка виникла під час приробітку об'єкта; або: поступова конструкційна легка часткова неявна відмова, яка виникла під час нормальної експлуатації об'єкта.

У деяких пристроях та елементах можуть виникнути відмови двох *протилежних* типів. Наприклад, у пристроях, призначення яких полягає у формуванні визначеного сигналу на виході у відповідь на визначені сполучення сигналів на входах, приміром у логічних елементах, дискретних датчиках, пристроях контролю і діагностування,

регуляторах, можливі відмови таких двох типів: а) *немає сигналу*, коли він має бути сформований, б) *поява сигналу*, коли його не має бути (*помилковий сигнал*). В електричних та електронних елементах (резисторах, напівпровідникових діодах, транзисторах, реле тощо) можуть виникати відмови таких двох протилежних типів: *обрив шини* і *коротке замикання*. У першому випадку падає до нуля провідність, але напруга досягає деякого ненульового значення; у другому – падає до нуля опір у визначеному напрямку. Все залежить від того, що в конкретному випадку можна розглядати як відмову об'єкта.

1.2. Критерії та показники надійності невідновлюваних об'єктів

Надійність недостатньо визначити на якісному рівні (висока, низька, прийнятна і т. п.) – потрібно вміти оцінювати її кількісно і порівнювати різні об'єкти за їх надійністю. Для цього вводяться критерії і показники властивостей надійності.

Показник надійності – це кількісна характеристика одної чи декількох одиничних властивостей (безвідмовності, довговічності тощо), що визначають надійність об'єкта. Показник надійності кількісно характеризує певні характеристики об'єкта, що обумовлюють його надійність. Одні показники надійності (наприклад, технічний ресурс, термін служби) можуть мати розмірність, деякі інші (наприклад, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності) є безрозмірними.

Нині у теорії надійності використовують ймовірнісні показники безвідмовності [2; 3; 4]. Кожен об'єкт характеризується вектором одиничних і комплексних показників. Оскільки під час порівняння один з варіантів може бути кращий від альтернативного варіанта за одним показником і гірший за іншим, серед показників вибирають той, котрий у конкретних умовах застосування щонайкраще відображає властивість

надійності і додає йому функцію критерію надійності. Зазвичай саме цей показник нормується в технічному завданні на розробку і в НТД. Можна стверджувати і таке: нормований показник надійності використовують як критерій надійності. Не слід думати, що ці поняття збігаються цілком, тому що нормуватися може один показник, а під час порівняння варіантів використовуватися інший.

Вибір та обґрунтування номенклатури показників надійності відбувається з урахуванням призначення об'єкта й умов його експлуатації [7; 36], тому перш ніж розглядати конкретний перелік показників надійності, корисно класифікувати об'єкти за зазначеними ознаками.

За **призначенням** об'єкти розділяють на два класи: вироби *конкретного* призначення, що мають тільки один варіант застосування за призначенням (наприклад принтер, канал вимірювання барометричного тиску, детектор радіаційного контролю та ін.), і вироби *загального* призначення, що мають кілька варіантів застосування, функція яких універсальна (наприклад, джерело електроживлення, комп'ютер, магістраль системи зв'язку внутрішнього інтерфейсу та ін.).

Щодо наявності **можливості відновлення працездатності** після відмови у період застосування за призначенням розрізняють невідновлювані (НВО) і відновлювані (ВО) об'єкти.

Відновлюваний об'єкт – це ремонтний об'єкт, який після відмови та усунення несправності (зокрема через заміну) знову здатний виконувати потрібні функції із заданими кількісними показниками надійності.

Невідновлюваний об'єкт – це об'єкт, ремонт якого неможливий чи не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності.

Примітка. Невідновлюваний об'єкт може бути як ремонтним, так і неремонтним (див. главу 1.1).

Об'єкт належить до групи відновлюваних, якщо його відновлення передбачене НТД і технічно можливе безпосередньо на місці його експлуатації. До групи невідновлюваних об'єкт відносять тоді, коли поточний ремонт технічно неможливий чи економічно недоцільний. При цьому у деяких випадках той самий об'єкт у різних умовах залежно від особливостей, етапів експлуатації або призначення можна вважати і відновлюваним, і невідновлюваним. Так, для ЛА, який перебуває в польоті на значній віддалі від ремонтних служб, це залежить від уміння льотного складу усувати відмови і несправності, від наявності запасних частин на борту ЛА, від тимчасових обмежень під час польоту та ін. Для автомобіля, наприклад, це залежить від досвіду водія, віддаленості від сервісних центрів, обмежень гарантійного обслуговування тощо.

До невідновлюваних об'єктів можна віднести окремі елементи систем ЛА (прості елементи), наприклад, напівпровідникові вироби, зубчасті колеса, підшипники кочення і т. п. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, літак, супутник, енергодвигунна установка, електронна апаратура зазвичай є відновлюваними, якщо їх відмови пов'язані з ушкодженнями одного або деяких елементів, які можуть бути замінені.

Залежно від можливості *технічного обслуговування* і потреби у ньому (виконання профілактичних робіт і контролю технічного стану) об'єкти бувають такими, що обслуговуються і що не обслуговуються.

Обслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною і/або конструкторською (проектною) документацією. *Необслуговуваний об'єкт* – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено документацією.

Ремонтпридатний (ремонтовний) об'єкт – це об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною, ремонтною і/або конструкторською (проектною) документацією. За аналогією

неремонтопридатний (неремонтовний) об'єкт – об'єкт, ремонт якого неможливий чи непередбачений документацією.

Залежно від *режиму застосування* об'єкти розділяють на три класи:

- однократного застосування;
- безупинного тривалого застосування;
- багаторазового циклічного застосування.

Відмову об'єкта можна розглядати як подію (випадкову або не випадкову). Подію називають достовірною, якщо вона обов'язково з'являється в результаті цього дослід, і неможливою, якщо вона не може відбутися (з'явитися) у результаті цього дослід. Подію, яка в результаті цього дослід може з'явитися, а також може і не з'явитися, називають випадковою подією. Випадковість появи події не означає, що немає будь-яких закономірностей і зв'язку між очікуваною подією і комплексом умов, що діють у процесі дослід. Наприклад, поява відмов у польоті літака буде вірогіднішою тоді, коли режим роботи бортових систем перевищуватиме розрахунковий. Ймовірність відмови буде тим більшою, чим більший ступінь перевищення розрахункового режиму. Тут виразно виявляється певний зв'язок між комплексом умов, що діють у процесі дослід, та очікуваною подією.

Показники надійності подають у двох формах (визначеннях):

- статистична (вибіркові оцінки);
- ймовірнісна.

Статистичні визначення (вибіркові оцінки) показників отримують за результатами випробувань на надійність. Для позначення статистичних оцінок будемо використовувати знак \wedge зверху над літерним позначенням статистичної величини, що розглядається.

Ймовірнісна форма подання показників зручна для аналітичних розрахунків, а статистична – для експериментального дослідження надійності.

Припустимо, що у процесі випробувань деякої кількості однотипних об'єктів отримано кінцеву кількість значень параметра, що цікавить дослідника – наробітку до відмови. Отримані числа є вибіркою якогось обсягу із загальної «генеральної сукупності», що має необмежений обсяг даних про наробіток до відмови об'єкта.

Кількісні показники, які визначені для «генеральної сукупності», є *істинними (ймовірнісними) показниками*, оскільки об'єктивно характеризують випадкову величину – наробіток до відмови.

Показники, що визначені для вибірки і дають змогу зробити якісь висновки про випадкову величину, є *вибірковими (статистичними) оцінками*. Очевидно, що за досить великої кількості випробувань (великої вибірки) оцінки *наближаються* до ймовірнісних показників.

Визначення вибіркових оцінок ґрунтується на математичних моделях теорії ймовірності і математичної статистики (основні мінімально необхідні відомості з теорії ймовірностей наведено в роботі [2]).

1.2.1. Показники надійності

Надійність є комплексною *якісною* властивістю, що включає в себе залежно від призначення об'єкта або умов його експлуатації такі прості (одиничні) властивості:

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтопридатність;
- збережуваність;
- готовність.

Розрізняють одиничні і комплексні властивості (складові) надійності. Комплексні показники характеризують кілька одиничних властивостей, наприклад безвідмовність і довговічність.

Комплексним показником іноді можна вважати коефіцієнт готовності, якщо він враховує безвідмовність і ремонтопридатність

об'єкта. До комплексних показників надійності належать також такі **коефіцієнти**:

- готовності;
- простою (неготовності);
- технічного використання;
- збереження ефективності.

Це різні поняття, які характеризуються індивідуальними показниками. Не можна зводити надійність до жодної з цих властивостей. Тільки їх обумовлена сукупність правильно розкриває зміст поняття «надійність».

Безвідмовність – це властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом заданого часу чи деякого наробітку.

Наробіток – це тривалість чи обсяг роботи об'єкта, що вимірюється в будь-яких неубувних (неспадаючих) величинах (одиниця часу, кількість циклів навантаження, кількість спрацьовувань, кілометри прольоту, польотні години і т. п.). Наприклад, для літаків наробіток може вимірюватися кількістю зльотів та посадок, кілометражем прольоту; для реле – кількістю переключень на деякому часовому інтервалі. Найчастіше для аналізу надійності ЛА (або його складових) використовують заданий час. У цьому разі наробіток вимірюється в одиницях часу і у випадку безупинного застосування об'єкта він може збігатися з календарним часом. Наробіток, протягом якого об'єкт, що знімається з експлуатації після першої ж відмови, зберігає працездатність, називають *наробітком до першої відмови*. Якщо наробіток збігається з календарним часом, його називають часом до першої відмови чи *часом безвідмовної роботи*. Для інших об'єктів (наприклад, відновлюваних) поряд з наробітком до першої відмови можна розглядати *наробіток між сусідніми відмовами*.

Довговічність – це властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану для встановленої системи технічного

обслуговування і ремонту. У технічній документації зазвичай вказують, який стан об'єкта треба вважати граничним.

Ремонтопридатність – властивість об'єкта, що полягає в його пристосованості до попередження й виявлення причин виникнення відмов, підтримки та відновлення працездатного стану шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування. Ремонтопридатний виріб, що відмовив, повинен мати відповідну конструкцію, бути пристосованим до контролю працездатності за всіма основними параметрами, демонтажу і монтажу працездатного устаткування.

Близьким до ремонтпридатності поняттям є відновлюваність (див. главу 1.2). Але ці два поняття не тотожні. Відновлюваність ремонтпридатного об'єкта залежить не тільки від пристосованості об'єкта до попередження, виявлення й усунення відмов, але і від підготовленості обслуговуючого персоналу, організаційно-технічних заходів щодо обслуговування і постачання необхідних запасних частин для об'єкта. Тобто, ремонтпридатний виріб стає відновлюваним, якщо під час його використання допускаються вимушені перерви в роботі всього виробу чи його складових частин, наявні потрібна контрольно-вимірювальна та випробувальна апаратура, запасні частини, засоби та приладдя технічної діагностики і налагодження, є обслуговуючий персонал відповідної кваліфікації. Із цього випливає, що не кожний ремонтпридатний виріб є відновлюваним. Більше того, той самий виріб у різних ситуаціях може бути або відновлюваним, або невідновлюваним. Проте не кожен відновлюваний виріб ремонтпридатний. Прикладом відновлюваного об'єкта може бути виріб, у якому відмова виникає внаслідок різкого погіршення умов функціонування. Його працездатність відновлюється без втручання персоналу відразу після повернення до нормальних умов функціонування. Працездатність також може відновлюватися через реконфігурацію технічних і програмних засобів без проведення ремонту чи заміни модуля, що відмовив.

Час, що витрачається на відновлювання працездатності об'єкта, називають часом відновлення. Він охоплює час виявлення відмови, час її локалізації, тривалість усунення відмови шляхом ремонту чи заміни несправної частини на запасну, тривалість налагодження і передпускової перевірки працездатності. Час усунення відмови, крім часу ремонту чи власне заміни, охоплює тривалість доставки об'єкта, що відмовив, з місця експлуатації до ремонтної бази і назад та час очікування у випадку поломки ремонтного об'єкта, або час доставки запасної частини зі складу до місця експлуатації (у випадку заміни).

Збережуваність – це властивість об'єкта безупинно зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції протягом (і після) зберігання і транспортування. Збережуваність характеризує поведінку об'єкта в умовах, які істотно відрізняються від нормальних умов експлуатації. Насамперед, під час зберігання і транспортування, коли об'єкт знаходиться у вимкненому стані.

Крім того, часто на збережуваність впливають температура навколишнього середовища, вологість, інші кліматичні умови та механічні навантаження, які можуть суттєво відрізнитися від робочих під час експлуатації.

Готовність – властивість об'єкта бути здатним виконувати потрібні функції в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Ця властивість залежить від забезпечення технічного обслуговування і ремонту. Потрібні зовнішні ресурси, що не належать до ресурсів технічного обслуговування і ремонту (наприклад, наявність палива або електропостачання) і не впливають на властивість готовності об'єкта.

1.2.2. Кількісні показники безвідмовності

До найбільш важливих показників безвідмовності невідновлюваних технічних об'єктів належать такі:

- *ймовірність безвідмовної роботи;*
- *ймовірність відмов;*
- *щільність розподілу відмов;*
- *інтенсивність відмов.*

Для оцінювання показників безвідмовності розглянемо таку схему випробувань.

Нехай на випробування поставлено N однакових (однотипних) об'єктів. Умови випробувань ідентичні, а випробування *кожного* з об'єктів проводять до його відмови (випробування закінчуються, коли відмовить *останній* об'єкт, тобто коли відмовлять *всі* об'єкти).

Введемо такі позначення: $T = \{t_1, \dots, t_N\} = \{t\}$ – випадкова величина наробітку об'єкта до відмови; $N(0)$ – кількість об'єктів, працездатних на початок випробування (іспиту) за $t=0$; якщо вважати, що у разі вмикання відмови неможливі, то $N(0)$ дорівнює загальній кількості об'єктів: $N(0) = N$; $N(t)$ – кількість об'єктів, працездатних до моменту наробітку t ; $n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили до моменту наробітку t ; $\Delta n(t, t + \Delta t)$ – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі наробітку $[t, t + \Delta t]$; Δt – тривалість інтервалу наробітку.

Основною досліджуваною випадковою величиною (показником безвідмовності) для *невідновлюваних* об'єктів є *наробіток до першої відмови* T . Якщо наробіток вимірюється в одиницях часу, то він збігається з календарним часом для об'єктів, що працюють у режимах однократного і багатократного застосування, і з сумарною тривалістю виконаних циклів – для тих, що працюють у режимі циклічного застосування. Якщо відмова може знецінювати частину наробітку, то в наробіток до відмови включають тільки ту її частину, яка не знецінена відмовою. Ймовірнісні характеристики наробітку T і є показниками безвідмовності НВО. Їх особливість полягає в тому, що їх визначають за

наслідками спостережень за деякою *множиною* екземплярів однотипних об'єктів, але використовують як показник надійності *кожного конкретного об'єкта*. Тому надалі, окрім ймовірнісного, наведене також статистичне визначення, яке можна використовувати як один зі способів статистичного оцінювання шуканої ймовірнісної характеристики.

Ймовірність безвідмовної роботи (ІБР) $P(t)$ є ймовірністю того, що об'єкт буде працездатний протягом заданого наробітку T за заданих умов експлуатації:

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (1.1)$$

У початковий момент часу $P(0) = 1$, якщо на початку спостереження під час вмикання об'єктів відмови неможливі, і $0 < P(0) < 1$, якщо під час вмикання виріб може відмовити. Зі збільшенням часу ймовірність $P(t)$ поступово зменшується і для будь-яких технічних виробів асимптотично наближається до нуля.

За статистичними даними про відмови ймовірність безвідмовної роботи визначають за формулою

$$\hat{P}(t) = \frac{N(0) - n(t)}{N(0)}. \quad (1.2)$$

Отже, статистичну оцінку ІБР (емпіричну функцію надійності) знаходять за формулою $\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N(0)}$.

Оцінку ІБР можна розглядати як показник частки працездатних об'єктів до моменту наробітку t .

Ймовірність відмови (ІВ) $Q(t)$ є ймовірністю того, що за заданих умов експлуатації протягом заданого наробітку відбудеться хоча б одна відмова:

$$Q(t) = P\{T < t\}. \quad (1.3)$$

Згідно з виразом (1.3), функцію $Q(t)$ можна трактувати як функцію розподілу випадкової величини T .

Відмова і безвідмовна робота – протилежні події, тому

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.4)$$

У статистичному визначенні оцінка ІВ є емпіричною функцією розподілу відмов. З формул (1.2) та (1.4) випливає, що статистична оцінка ІВ

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N(0)}. \quad (1.5)$$

Оскільки $N(t) = N(0) - n(t)$, то $\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N(0)} = 1 - \hat{Q}(t)$.

Диференціал функції $Q(t)$ називають елементом ймовірності відмови, він є ймовірністю того, що відмова відбудеться в нескінченно малому околі точки t :

$$dQ(t) = P\{t \leq T < t + dt\}. \quad (1.6)$$

Унаслідок того, що події, які полягають у настанні або ненастанні відмови до моменту наробітку t , є протилежними, то $\hat{P}(t) + \hat{Q}(t) = 1$. Легко переконатися, що ІБР є спадною, а ІВ – зростаючою функцією наробітку:

– у момент початку випробувань $t=0$ кількість працездатних об'єктів дорівнює їх загальній кількості $N(t) = N(0) = N$, а кількість об'єктів, що відмовили $n(t) = n(0) = 0$, тому $\hat{P}(t) = \hat{P}(0) = 1$, $\hat{Q}(t) = \hat{Q}(0) = 0$;

– якщо наробіток $t \rightarrow \infty$, усі об'єкти, які поставлені на випробування, відмовлять, тобто $N(\infty) = 0$, $n(\infty) = N(0)$, тому $\hat{P}(t) = \hat{P}(\infty) = 0$ і $\hat{Q}(t) = \hat{Q}(\infty) = 1$.

Графіки ІБР та ІВ зображено на рис. 1.2.

Гранично, зі збільшенням кількості N (збільшення вибірки) випробовуваних об'єктів, оцінки $\hat{P}(t)$ та $\hat{Q}(t)$ сходяться за ймовірністю (наближаються за значеннями) до $P(t)$ і $Q(t)$, відповідно.

Збіжність за ймовірністю можна подати у такий спосіб:

$$P\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} |\hat{P}(t) - P(t)| = 0\right\} = 1.$$

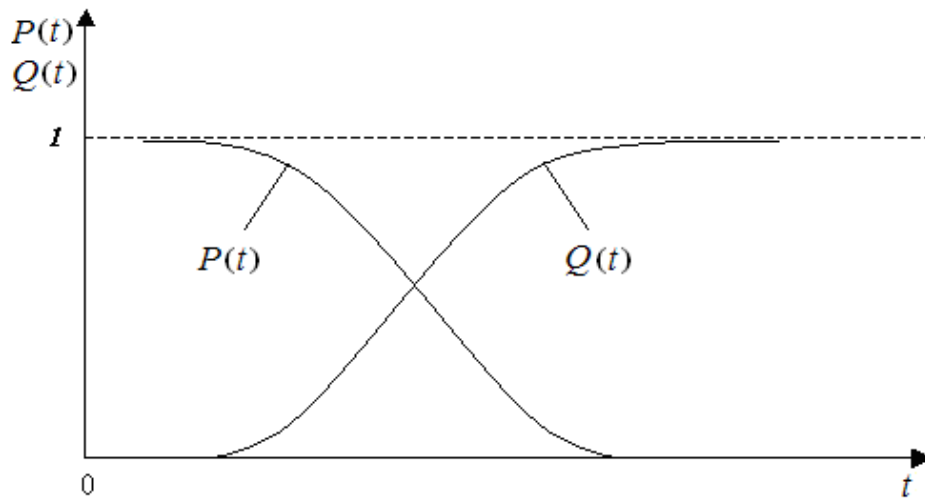


Рис. 1.2. Графіки зміни ймовірностей $P(t)$ та $Q(t)$ на всій осі наробітку t

Практичний інтерес становить визначення ІБР в інтервалі наробітку $[t, t + \Delta t]$, за умови, що об'єкт безвідмовно проробив до початку t інтервалу. Визначимо цю ймовірність, використовуючи теорему множення ймовірностей і виділивши такі події:

$A = \{\text{безвідмовна робота об'єкта до моменту } t\};$

$B = \{\text{безвідмовна робота об'єкта в інтервалі } \Delta t\};$

$C = A \wedge B = \{\text{безвідмовна робота об'єкта до моменту } t + \Delta t\}.$

Очевидно, що

$$P(C) = P(A \wedge B) = P(A) \cdot P(B|A), \quad (1.7)$$

оскільки події A та B будуть залежними.

Умовна ймовірність $P(B|A)$ – це ІБР $P(t, t + \Delta t)$ в інтервалі $[t, t + \Delta t]$, тому, з урахуванням виразу (1.7), отримаємо

$$P(B|A) = P(t, t + \Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)}. \quad (1.8)$$

Ймовірність відмови в інтервалі наробітку $[t, t + \Delta t]$ з урахуванням формули (1.8)

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t, t + \Delta t) = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)}.$$

Щільність розподілу відмов (ЩРВ) $f(t)$ є щільністю ймовірності випадкової величини наробітку об'єкта до відмови. Як кожний показник надійності, вона має статистичне та ймовірнісне визначення.

Статистичну оцінку ЩРВ визначають відношенням кількості об'єктів $\Delta n(t, t + \Delta t)$, які відмовили в інтервалі наробітку $[t, t + \Delta t]$, до добутку загальної кількості об'єктів $N = N(0)$ на тривалість інтервалу наробітку Δt :

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \Delta t}. \quad (1.9)$$

Оскільки $\Delta n(t, t + \Delta t) = n(t + \Delta t) - n(t)$, де $n(t + \Delta t)$ – кількість об'єктів, що відмовили до моменту наробітку $t + \Delta t$, то оцінку ЩРВ можна подати у вигляді

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [\hat{Q}(t + \Delta t) - \hat{Q}(t)] = \frac{\Delta \hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (1.10)$$

де $\hat{Q}(t, t + \Delta t)$ – оцінка ІВ в інтервалі наробітку Δt .

Статистична оцінка ЩРВ – це «частота» відмов, тобто кількість відмов за одиницю наробітку, віднесена до початкової кількості об'єктів. Спостерігаючи за роботою N об'єктів можна визначити частоту відмов як відношення кількості об'єктів, що відмовили в одиницю часу, до загальної кількості об'єктів за умови, що об'єкти, які відмовили, не відновлюються:

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N \Delta t},$$

де $\Delta n(t, \Delta t) = n(t + \frac{\Delta t}{2}) - n(t - \frac{\Delta t}{2})$ – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі $(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2})$.

Ймовірнісне визначення ЩРВ випливає з рівняння (1.10) у разі, коли інтервал наробітку прямує до нуля, $\Delta t \rightarrow 0$, і об'єм вибірки збільшується до нескінченності, $N \rightarrow \infty$:

$$f(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta N \rightarrow \infty}} \frac{\Delta \hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.11)$$

Оскільки $Q(t)$ завжди є неспадною функцією свого аргументу, то завжди $f(t) \geq 0$. Згідно з ймовірнісним визначенням, $f(t) = Q'(t) = -P'(t)$;

$$Q(t) = \int_0^t f(x) dx; \quad P(t) = \int_t^\infty f(x) dx.$$

Один із можливих варіантів графіка $f(t)$ зображений на рис. 1.3.

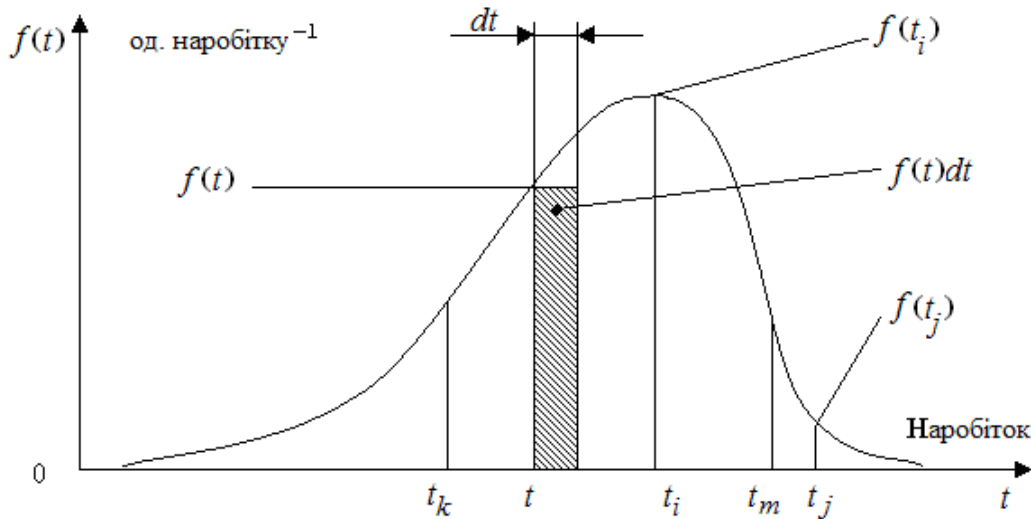


Рис. 1.3. Графік ЩРВ у загальному випадку

Як видно з рис. 1.3, ЩРВ $f(t)$ характеризує частоту відмов (або зведену ІВ), з якою розподіляються конкретні значення наробітків (t_1, \dots, t_N) всіх N об'єктів, які становлять випадковий розмір наробітку T до відмови об'єкта цього типу. Припустимо, у результаті випробувань встановлено, що значення наробітку t_i властиве найбільшій кількості об'єктів. Про це свідчить максимальний розмір $f(t_i)$. Навпаки, найбільший наробіток t_j був зафіксований тільки у декількох об'єктів, тому й частота $f(t_j)$ появи такого наробітку на загальному фоні буде малою.

Одиниця виміру $[f(t)]$ буде обернено пропорційною розмірності наробітку $[t]$, тобто, якщо наробіток вимірюється у циклах, $f(t)$ буде вимірюватись у $\frac{1}{\text{цикл}}$.

Відкладемо на осі абсцис деякий наробіток t і нескінченно малий інтервал наробітку шириною dt , що прилягає до t .

Тоді ймовірність влучення випадкової величини наробітку T на елементарну ділянку шириною dt (з точністю до нескінченно малих вищого порядку)

$$P\{T \in (t, t + dt)\} = P\{t < T < t + dt\} \approx f(t)dt,$$

де $f(t)dt$ – елемент ІВ об'єкта в інтервалі $[t, t + dt]$ (геометрично – це площа заштрихованого прямокутника, що спирається на відрізок dt).

Аналогічно ймовірність влучення наробітку T в інтервал $[t_k, t_m]$

$$P\{T \in (t_k, t_m)\} \approx \sum_{t_i \in (t_k, t_m)} f(t_i)dt_i \approx \int_{t_k}^{t_m} f(t)dt, \quad (1.12)$$

що геометрично інтерпретується площею під кривою $f(t)$, яка спирається на ділянку $[t_k, t_m]$.

Ймовірність відмови та ІБР можна виразити через функцію ЩРВ. Оскільки $Q(t) = P\{0 < T < t\}$, то, використовуючи вираз (1.12), отримаємо

$$Q(t) = P\{0 < T < t\} = P\{T \in (0, t)\} = \int_0^t f(t)dt.$$

Розширення інтервалу вліво тільки до нуля (не перетинаючи області від'ємних чисел) викликане тим, що значення T не може бути від'ємним, тобто завжди $T \geq 0$.

Оскільки $P(t) = P\{T \geq t\}$, то $P(t) = P\{t \leq T < \infty\} = \int_t^{\infty} f(t)dt$. Очевидно, що

$Q(t)$ є площею під кривою $f(t)$ ліворуч від t , а $P(t)$ – площею під $f(t)$ праворуч від t . Оскільки всі отримані під час випробувань значення наробітків перебувають під кривою $f(t)$, то

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

Інтенсивність відмов (ІнВ) $\lambda(t)$ – це умовна щільність ймовірності виникнення відмови об’єкта, яку визначають за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Інтенсивність відмов, як кожний показник безвідмовності, має статистичне та ймовірнісне визначення.

Статистичну оцінку ІнВ знаходять з відношення кількості об’єктів $\Delta n(t, t + \Delta t)$, які відмовили в інтервалі наробітку $[t, t + \Delta t]$, до добутку кількості $N(t)$ працездатних об’єктів у момент t на тривалість інтервалу наробітку Δt :

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}. \quad (1.13)$$

Порівнюючи вирази (1.9) і (1.13) можна зазначити, що *ІнВ більш повно характеризує надійність об’єкта на момент наробітку t , ніж ЦРВ*, оскільки показує частоту відмов, віднесену до фактичної працездатної кількості об’єктів $N(t)$ на момент наробітку t .

За статистичним визначенням, інтенсивність відмов є відношення кількості об’єктів, що відмовили в одиницю часу, до середньої кількості об’єктів, які працездатні на певному (розглянутому) відрізку часу:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N_{\text{сеп}}\Delta t}, \text{ де } N_{\text{сеп}} = N(0) - \frac{n\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + n\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)}{2}.$$

Імовірнісне визначення ІнВ отримаємо, якщо помножимо чисельник і знаменник правої частини виразу (1.13) на N :

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} \cdot \frac{N}{N} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N\Delta t} \cdot \frac{N}{N(t)}.$$

З урахуванням виразів (1.5), (1.9) та (1.10), оцінку ІнВ $\hat{\lambda}(t)$ можна розглядати як $\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta \hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\hat{P}(t)}$, звідки за $\Delta t \rightarrow 0$ та $N \rightarrow \infty$

$$\lambda(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\Delta \hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\hat{P}(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Можливі графіки зміни ІнВ $\lambda(t)$ зображено на рис. 1.4.

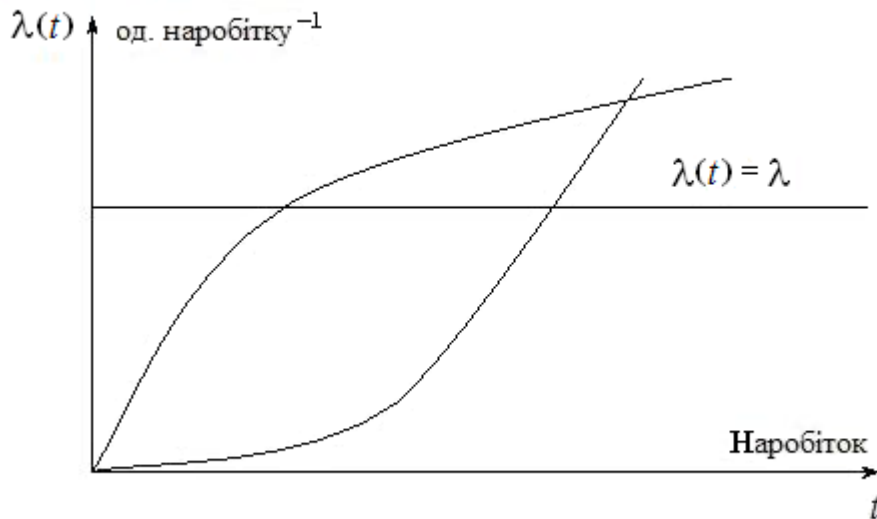


Рис. 1.4. Графіки інтенсивності відмов для різних видів розподілу відмов

Одиниця виміру ІнВ $[\lambda(t)] = \frac{1}{[t]}$, де $[t]$ — одиниця виміру наробітку.

Якщо до початку певного інтервалу часу виріб уже пропрацював протягом часу τ , то для оцінювання надійності потрібно вводити умовні показники за умови, що виріб уже якийсь час проробив безвідмовно. Розглянемо деякі з цих параметрів, вважаючи, що одна з функцій — $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ або $\lambda(t)$ — відома.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(\tau, t)$. Ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі $(\tau, \tau + t)$ визначають як ймовірність того, що відмови не буде в інтервалі $\tau + t$ за умови, що її не було протягом часу τ :

$$P(\tau, t) = P(T > \tau + t | T > \tau) = \frac{P(\tau + t)}{P(\tau)} = \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau+t} \lambda(x) dx\right), \quad (1.15)$$

де $P(t)$ — функція (1.1). Інші показники надійності в інтервалі $(\tau, \tau + t)$ знаходять за формулами

$$\begin{aligned}
Q(\tau, t) &= 1 - P(\tau, t) = 1 - \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau+t} \lambda(x) dx\right); \\
f(\tau, t) &= \frac{d}{dt} Q(\tau, t) = -\frac{d}{dt} P(\tau, t) = \frac{f(\tau+t)}{P(\tau)}; \\
\lambda(\tau, t) &= \frac{d}{dt} \ln Q(\tau, t) = -\frac{d}{dt} \ln P(\tau, t) = \lambda(\tau+t),
\end{aligned} \tag{1.16}$$

де $P(\tau, t)$ знаходять за формулою (1.15).

1.2.3. Рівняння зв'язку показників безвідмовності

Оскільки є однозначний зв'язок між функціями $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ і $\lambda(t)$, достатньо задати лише одну з них, щоб за формулами зв'язку знайти всі інші, тобто в сенсі повноти відомостей про надійність об'єкта ці функції еквівалентні. Їх знаходять за статистичними даними про кількість відмов невідновлюваних об'єктів.

У параграфі 1.2.2 наведено вирази, що визначають ІБР та ІВ у функції ЩРВ $f(t)$. Оскільки ІВ $\lambda(t)$ є більш повною характеристикою надійності, можна виразити ІБР $P(t)$ через ІВ.

Використовуючи вираз для інтенсивності відмов $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$ і вираз

$$(1.11) \quad f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}, \quad \text{запишемо:} \quad \frac{dP(t)}{dt} = -\lambda(t)P(t). \quad \text{Розділимо змінні,}$$

помножуючи обидві частини на $\frac{dt}{P(t)}$, отримаємо $\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt$.

Інтегруючи від 0 до t та, беручи до уваги, що за $t=0$ ІБР об'єкта $P(0)=1$,

$$\text{отримаємо} \quad \int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = -\int_0^t \lambda(t)dt.$$

Оскільки $\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t)$, то рівняння зв'язку основних

показників надійності має вигляд

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\} = 1 - Q(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)}. \quad (1.17)$$

Ймовірність $\lambda(t)dt$ означає, що елемент, який безвідмовно пропрацював в інтервалі наробітку $[0, t]$, відмовить в інтервалі $[t, t + dt]$.

Рівняння зв'язку (1.17) показує, що всі показники надійності $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ та $\lambda(t)$ рівнозначні у тому розумінні, що коли відомий один із них, можна знайти інші.

1.2.4. Числові характеристики показників безвідмовності

Розглянуті функціональні показники надійності $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ та $\lambda(t)$ повністю описують випадкову величину наробітку $T = \{t\}$. Водночас для розв'язання деяких практичних задач надійності виникає необхідність знати деякі **числові** характеристики цієї випадкової величини: ***середній наробіток до відмови, дисперсію і середнє квадратичне відхилення (СКВ).***

Статистична оцінка середнього наробітку до відмови – це середнє арифметичне значення

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.18)$$

де t_i – наробіток до відмови i -го об'єкта.

Імовірнісне визначення середнього наробітку до відмови являє собою ***математичне сподівання (МС)*** випадкової величини T , його визначають як

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (1.19)$$

Використовуючи вираз (1.11) для ЩРВ $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$ та інтегрування частинами, можна звести вираз (1.19) до вигляду

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (1.20)$$

з урахуванням того, що $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

З виразу (1.20) випливає, що середній наробіток до відмови геометрично інтерпретується як площа під кривою $P(t)$ (рис. 1.5).

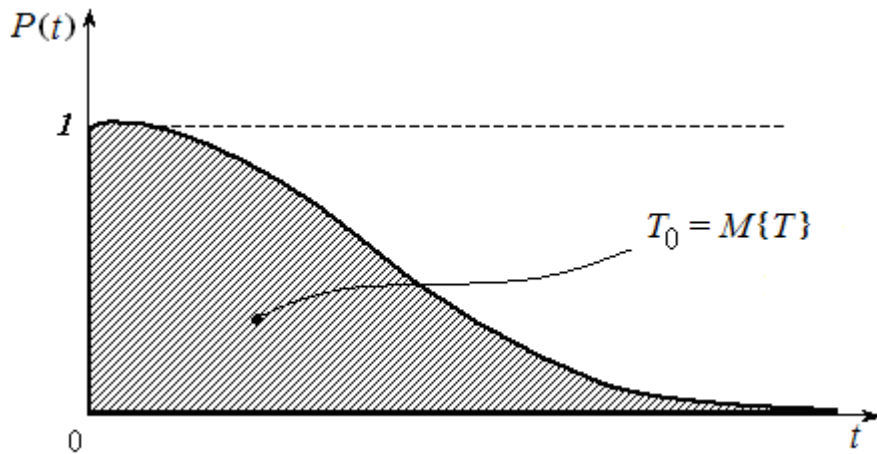


Рис. 1.5. Графічна інтерпретація значення середнього наробітку до відмови T_0

Очевидно, що зі збільшенням вибірки випробувань $N \rightarrow \infty$ оцінка T_0 за формулою (1.18) збігається за імовірністю з МС наробітку до відмови за формулою (1.20).

Математичне сподівання наробітку T_0 означає математично очікуваний наробіток до відмови однотипних елементів, тобто усереднений наробіток до першої відмови.

Для практичного застосування також становлять інтерес такі **умовні середні наробітки**:

1) **середній корисний наробіток** $T_0|_{t \leq t_1}$ знаходять за умови, що з досягненням наробітку t_1 усі працездатні об'єкти, які залишилися, знімають з експлуатації; тобто (за аналогією з T_0) $T_0|_{t \leq t_1} = \int_0^{t_1} P(t) dt$;

2) **середня тривалість майбутньої роботи** $T_0|_{t > t_1}$ — її знаходять за умови, що об'єкт безвідмовно працював на інтервалі $(0, t_1)$:

$$T_0|_{t>t_1} = M\{T - t_1\} = \frac{1}{P(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} P(t) dt.$$

Співвідношення між $T_0|_{t \leq t_1}$, $T_0|_{t > t_1}$ та T_0 таке:

$$T_0|_{t \leq t_1} + T_0|_{t > t_1} \cdot P(t_1) = T_0.$$

Причини, з яких використовують ці показники:

1. Високонадійні об'єкти (елементи електронних схем обчислювальної техніки ЛА тощо) зазвичай експлуатуються менший термін, ніж T_0 (час експлуатації $t_e < T_0$), тобто замінюються через моральне старіння раніше, ніж встигають вичерпати наробіток T_0 .

2. Часто для зазначених об'єктів період випробувань скорочують (проводять випробування до наробітків, які відповідають їх моральному старінню), тому T_0 у такому випадку розуміють як середній наробіток, що існував би в дійсності, якби ІВ залишалася такою самою, якою вона була в початковий період випробувань.

Графічні інтерпретації понять $T_0|_{t \leq t_1}$ та $T_0|_{t > t_1}$ подано на рис. 1.6.

Середній наробіток до першої відмови T_0 є математичним сподіванням наробітку до першої відмови T . Використовуючи визначення елемента ймовірності (1.6), можна записати:

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^{\infty} t dQ(t). \quad (1.21)$$

Якщо функція $Q(t)$ диференційована за всіх $t > 0$, то з виразів (1.11)

та (1.21) отримаємо $T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt$.

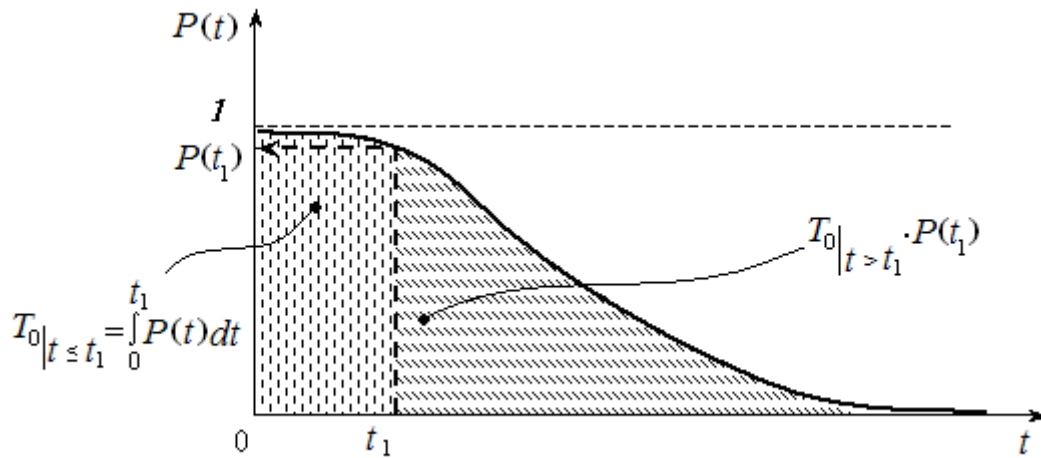


Рис. 1.6. Графічна інтерпретація понять середнього корисного наробітку і середньої тривалості майбутньої роботи відповідно

Якщо замінити у функції (1.21) $dQ(t)$ на $-dP(t)$, проінтегрувати за частинами і врахувати властивості функції $P(t)$, отримаємо $T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt$.

Звідси випливає, що середній наробіток до першої відмови дорівнює площі під кривою $P(t)$ на всій півосі $(0, \infty)$.

За результатами спостереження за роботою до відмови всіх $N(0)$ об'єктів можна скласти таку статистичну оцінку середнього наробітку до першої відмови: $\hat{T}_0 = \sum_{i=1}^{N(0)} P_i(t) \Delta t = \sum_{i=1}^{N(0)} \frac{t_i}{N(0)}$, де t_i – наробіток до відмови i -го об'єкта.

Середній залишковий наробіток до відмови $T_0(\tau)$ є математичним сподіванням випадкової величини $T - \tau$ за умови, що $T > \tau$. Використовуючи функції (1.16) і (1.21), запишемо вираз для середнього залишкового наробітку до першої відмови

$$T_0(\tau) = \int_0^{\infty} t dQ(\tau, t) = \int_0^{\infty} \frac{t dQ(\tau + t)}{P(\tau)} = \int_{\tau}^{\infty} \frac{P(t) dt}{P(\tau)}. \quad (1.22)$$

За $\tau = 0$ функція (1.22) збігається з функцією (1.21).

Водночас середній наробіток не може цілком характеризувати безвідмовність об'єкта. Так, за рівних середніх наробітків до відмови T_0 надійність об'єктів 1 і 2 може досить істотно розрізнятися (рис. 1.7). Очевидно, що з більшим розсіюванням наробітку до відмови (крива ЩРВ $f_2(t)$ нижча і ширша), об'єкт 2 менш надійний, ніж об'єкт 1.

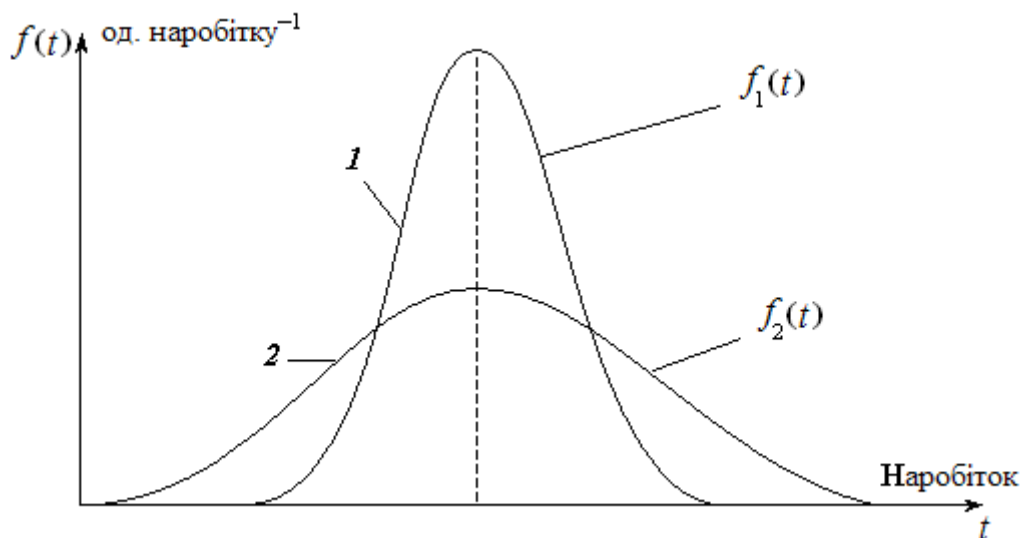


Рис. 1.7. Графіки ЩРВ за однакових T_0 і різних дисперсій $D_1 < D_2$

Тому для оцінювання надійності об'єкта за значенням \hat{T}_0 потрібно також знати і показники розсіювання випадкового значення $T = \{t\}$ поблизу середнього наробітку T_0 .

До показників розсіювання належать *дисперсія і СКВ наробітку до відмови*.

Дисперсія випадкової величини наробітку:

– статистична оцінка дисперсії:

$$\hat{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{T}_0)^2;$$

– імовірнісне визначення дисперсії:

$$D = D\{T\} = M\{(T - T_0)^2\} = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt.$$

Середнє квадратичне відхилення випадкової величини наробітку:

– статистична оцінка:

$$\hat{S}^2 = \hat{D} \text{ або } \hat{S} = \left| \pm \sqrt{\hat{D}} \right| = \sqrt{\hat{D}};$$

– імовірнісне визначення:

$$S^2 = S^2\{T\} = D\{T\}; \text{ або } S = \left| \pm \sqrt{D\{T\}} \right| = \sqrt{D\{T\}}.$$

Згідно з ДСТУ 2680-94 до показників безвідмовності належить *гамма-відсотковий наробіток до відмови*, який характеризує наробіток, протягом якого відмова об'єкта не виникає з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

1.2.5. Показники довговічності та збережуваності

Розглянемо показники складової надійності – **довговічності**. Це поняття характеризує тривалість роботи об'єкта.

Технічний ресурс – наробіток об'єкта від початку його експлуатації або поновлення експлуатації після ремонту до настання граничного стану. По суті, технічний ресурс може бути регламентований у такий спосіб: до середнього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту і т. п. Якщо регламентації немає, то мають на увазі ресурс від початку експлуатації до досягнення граничного стану після всіх видів ремонтів.

Для невідновлюваних об'єктів поняття технічного ресурсу і наробітку до відмови збігаються.

Призначений ресурс – сумарний наробіток об'єкта, з досягненням якого експлуатація має бути припинена згідно з НТД незалежно від його стану.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації (зокрема зберігання, ремонт і т. п.) від її початку до настання граничного стану згідно з НТД. Оскільки термін служби фактично є календарним часом працездатності об'єкта, то він завжди вимірюється в одиницях часу (години, місяці, роки тощо).

Графічно приклад експлуатації об'єкта показано на рис. 1.8.

Позначення на рис. 1.8 означають:

$t_0 = 0$ – початок експлуатації об'єкта;

t_1, t_5 – моменти відключення з технологічних причин;

t_2, t_4, t_6, t_8 – моменти вмикання об'єкта;

t_3, t_7 – моменти виведення об'єкта для ремонту, відповідно, середнього і капітального;

t_9 – момент припинення експлуатації згідно з НТД;

t_{10} – момент відмови об'єкта (настання граничного стану).

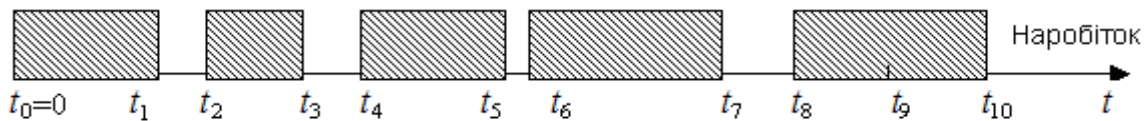


Рис. 1.8. Графічна інтерпретація показників довговічності

Технічний ресурс (наробіток на відмову)

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Призначений ресурс $PR = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$

Термін служби об'єкта $ТС = t_{10}.$

Для більшості об'єктів авіаційної техніки як критерій довговічності найчастіше використовують технічний ресурс.

Ймовірнісні показники довговічності. Для визначення показників довговічності вводять такі випадкові величини: ресурс T_p – сумарний наробіток об'єкта від початку експлуатації до переходу в граничний стан, що встановлений у технічній документації; термін служби $T_{сл}$ – календарна тривалість служби об'єкта від початку його експлуатації до переходу у граничний стан. Розрізняють середній, гамма-процентний і призначений ресурси (термін служби). Середній і гамма-процентний ресурси (термін служби) – це, відповідно, математичне сподівання випадкової величини T_p (або $T_{сл}$) і квантиль за рівнем ймовірності γ , що виражений у відсотках. *Залишковий ресурс* $T_{p.з}$ (залишковий термін служби $T_{сл.з}$) – це сумарний наробіток (календарна тривалість) від

моменту контролю технічного стану до переходу у граничний стан. Аналогічно вводять поняття залишкового терміну збереження (зберігання) $T_{зб.з}$. Для випадкових величин $T_{р.з}$, $T_{сл.з}$ і $T_{зб.з}$ використовуються ті ж самі характеристики, що і для T_p , $T_{сл}$ і $T_{зб}$.

Показники збережуваності. Для оцінювання збережуваності розглядають характеристики випадкової величини – **терміну зберігання**, обумовленого як календарна тривалість збереження і/чи транспортування об'єкта, протягом якої зберігаються у заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати задані функції. Як показники збережуваності використовують *середній і гамма-процентний терміни зберігання*.

1.3. Критерії та показники надійності відновлюваних об'єктів

Типова діаграма функціонування **відновлюваних** об'єктів складається з інтервалів безвідмовної роботи і відновлення, що чергуються. Експлуатація об'єкта триває доти, поки ремонт не стає недоцільним або поки об'єкт не буде знятий з експлуатації після досягнення призначеного терміну служби або призначеного ресурсу. Для оцінювання надійності таких об'єктів недостатньо розглядати характеристики наробітку до першої відмови – потрібно знати також характеристики процесу функціонування після першої відмови. З цією метою в теорії надійності вивчають характеристики таких випадкових величин: наробіток між відмовами T_{0i} , час відновлення після i -ї відмови T_{vi} , наробіток до i -ї відмови T_{ni} , повний час до i -го відновлення T_i , кількість відмов $N_0(t)$ до отримання наробітку t , кількість моментів відновлення $N_v(t)$ за час t , сумарний наробіток $T_{н.сум}(t)$ в інтервалі $(0, t)$, сумарний час відновлення $T_{в.сум}(t)$ в інтервалі тривалістю t .

Характеристики цих випадкових величин якраз і є показниками надійності відновлюваних об'єктів. Для формулювання визначень

використовують такі позначення: $F_i(t) = P(T_{\text{в}i} < t)$ – розподіл наробітку до i -ї відмови, $V_i(t) = P(T_{\text{в}i} < t)$ – розподіл часу до i -го відновлення, $P_n(t) = P(N_0(t) = n)$ – ймовірність виникнення n відмов до отримання наробітку t , $P_{\text{в}n}(t) = P(N_{\text{в}}(t) = n)$ – ймовірність виникнення n моментів відновлення за час t . Розглянемо тепер показники надійності.

Показники ремонтпридатності. До них належать ймовірність відновлення $F_{\text{в}i}(t) = P(T_{\text{в}} < t)$ за час t , ймовірність $G_{\text{в}}(t) = P(T_{\text{в}} \geq t)$ того, що відновлення не закінчиться за час t ; щільність розподілу часу відновлення $f_{\text{в}}(t) = F'_{\text{в}}(t)$; інтенсивність відновлення $\mu(t) = \frac{f_{\text{в}}(t)}{G_{\text{в}}(t)}$; середній час відновлення $\bar{T}_{\text{в}}$.

Ймовірнісне і статистичне визначення середнього часу відновлення знаходять за формулами $\bar{T}_{\text{в}} = \int_0^{\infty} t f_{\text{в}}(t) dt = \int_0^{\infty} G_{\text{в}}(t) dt$, $\hat{T}_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{\text{в}i}}{n}$, де n – кількість відмов; $T_{\text{в}i}$ – тривалість i -го відновлення.

Середня кількість відмов $H(t)$ до наробітку t є математичним сподіванням випадкової величини $N_0(t)$. Використовуючи введені раніше позначення, можемо записати: $H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n P_n(t)$.

Враховуючи, що події $\{T_{\text{в}i} < t\}$ та $\{N_0(t) \geq i\}$ еквівалентні, отримуємо співвідношення

$$P_n(t) = P(N_0(t) = n) = P(N_0(t) > n) - P(N_0(t) > n+1) = F_n(t) - F_{n+1}(t);$$

$$H(t) = F_1(t) - F_2(t) + 2[F_2(t) - F_3(t)] + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t). \quad (1.23)$$

З формули (1.23) випливає, що диференціал функції $dH(t)$ є ймовірністю того, що в нескінченно малому околі точки t відбудеться відмова об'єкта, причому не обов'язково вперше. Статистичну оцінку середньої кількості відмов отримують у такий спосіб. Нехай у початковий момент часу поставлено на експлуатацію $N(0)$ об'єктів.

Після відмови об'єкт ремонтують або замінюють новим, і так відбувається доти, поки на кожному робочому місці не буде досягнутий наробіток t . Якщо сумарна кількість відмов усіх $N(0)$ об'єктів дорівнює $n(t)$, то середня кількість відмов

$$\bar{H}(t) = \frac{n(t)}{N(0)}. \quad (1.24)$$

За формою права частина рівняння (1.24) збігається з виразом (1.5). Однак $\bar{Q}(t)$ і $\bar{H}(t)$ – зовсім різні функції, тому що у виразі (1.5) розглядаються невідновлювані об'єкти, а у рівнянні (1.24) – відновлювані. У першому випадку кількість працездатних об'єктів зменшується з часом, а в другому випадку вона незмінна і дорівнює $N(0)$. Тому за інших однакових умов $n(t)$ у рівнянні (1.24) звичайно більша, ніж у виразі (1.5), за рахунок повторних відмов об'єктів.

Середня кількість моментів відновлення $H_2(t)$ на інтервалі часу $(0, t)$ є математичним сподіванням випадкової величини $N_B(t)$,

$$H_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} nP_{Bn}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n[V_n(t) - V_{n+1}(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t). \quad (1.24a)$$

Диференціал функції $dH_2(t)$ є ймовірністю того, що в нескінченно малому околі точки t працездатність об'єкта відновиться, причому не обов'язково вперше.

Параметр (інтенсивність) потоку відмов $\omega(t)$. Відповідно до імовірнісного визначення,

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (1.25)$$

З формул (1.23) та (1.25) отримаємо

$$\omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t), \quad (1.26)$$

де $f_n(t)$ – щільність розподілу наробітку до n -ї відмови. Відповідно до статистичного визначення, параметр потоку відмов є середньою

кількістю відмов відновлюваного об'єкта за одиницю часу. Знаходять цей параметр за формулою

$$\bar{\omega}(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N(0)\Delta t}, \quad (1.27)$$

де $n(t, \Delta t) = n\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - n\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)$; $n(t)$ – кількість відмов до наробітку t .

Параметр потоку відновлення $\omega_2(t)$ є середньою кількістю моментів відновлення за одиницю часу. Формули для $\omega_2(t)$ отримують із формул для $\omega(t)$ після заміни в них кількості відмов на кількість моментів відновлення. Так, з виразів (1.25)–(1.27) маємо:

$$\omega_2(t) = \frac{dH_2(t)}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{dV_n(t)}{dt}, \quad \bar{\omega}_2(t) = \frac{n_b(t)}{N(0)\Delta t}.$$

Середній наробіток на відмову \bar{T}_H . Відповідно до ймовірнісного визначення, для періоду від наробітку τ до наробітку $\tau + t$ середній наробіток на відмову знаходять за формулою $\bar{T}_H(\tau, t) = \frac{t}{(H(\tau + t) - H(\tau))}$.

Якщо врахувати рівняння (1.24), то можна визначити середній наробіток на відмову за статистичними даними:

$$\bar{T}_H(\tau, t) = \frac{tN(0)}{n(\tau + t) - n(\tau)} = \frac{t}{\bar{H}(\tau + t) - \bar{H}(\tau)}.$$

Зокрема, якщо $\tau = 0$, маємо $\bar{T}_H(0, t) = \bar{T}_H(t) = \frac{t}{H(t)}$.

Стаціонарне значення середнього наробітку на відмову

$$\bar{T}_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{t}{H(t)} \right) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\omega(t)} \right). \quad (1.28)$$

Якщо спостереження за об'єктом проводиться не до наробітку t , а протягом часу t , то статистична оцінка середнього наробітку на відмову

$$\hat{T}_0(t) = \frac{\sum_{i=1}^n T_{0i} + T_0^*}{n} = \frac{T_{H.cym}(t)}{n}, \quad (1.29)$$

де n – кількість відмов за час t ; T_0^* – наробіток від моменту останнього відновлення до моменту t .

Показники надійності $V(t)$, $\omega_2(t)$ і $H_2(t)$ є комплексними, оскільки залежать від показників безвідмовності й ремонтпридатності. Розглянемо інші комплексні показники надійності відновлюваних об'єктів.

Нестаціонарний коефіцієнт готовності $K_r(t)$ є ймовірністю того, що об'єкт виявиться у працездатному стані в момент часу t у період використання за призначенням. Використовуючи статистичні дані, можна оцінити нестаціонарний коефіцієнт готовності за допомогою співвідношення

$$K_r(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{T_{\text{н.сум}}(t)}{t}, \quad (1.30)$$

де $N(t)$ – кількість працездатних у момент часу t об'єктів із загальної кількості об'єктів $N(0)$.

Коефіцієнт готовності (стаціонарний коефіцієнт готовності) K_r . Якщо проаналізувати залежність нестаціонарного коефіцієнта готовності від часу, то можна помітити, що він змінюється від 1 в початковий момент $t = 0$ до деякого постійного значення, яке називають стаціонарним коефіцієнтом готовності, або просто коефіцієнтом готовності. Оскільки коефіцієнт готовності не залежить від часу, то його визначають як імовірність того, що об'єкт виявиться у працездатному стані в довільний момент часу, за винятком планованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається. Стаціонарний період експлуатації, коли $K_r(t)$ стає досить близьким до свого граничного значення, починається після закінчення деякого проміжку часу, який називають перехідним періодом. Строго математично перехідний період триває нескінченно довго, тому що функція $K_r(t)$ наближається до K_r тільки асимптотично, а тому

$$K_{\Gamma} = \lim_{i \rightarrow \infty} K_{\Gamma}(t). \quad (1.31)$$

Із формул (1.30) і (1.31) випливає, що для коефіцієнта готовності може бути використана статистична оцінка $\bar{K}_{\Gamma} = \frac{N(\infty)}{N(0)} = \frac{N}{N(0)}$, де N – кількість працездатних об'єктів із загальної кількості $N(0)$ у довільний момент часу стаціонарного періоду експлуатації.

У режимі багаторазового циклічного застосування (БРЦЗ) коефіцієнт готовності має також таке трактування – це ймовірність успішного виконання одного циклу робіт дуже малої тривалості за заявкою на ремонт, що надійшла в момент t або в довільний момент часу. Якщо заявка з'являється у випадковий момент перехідного періоду $(0, t)$, то використовують середнє значення коефіцієнта готовності

$$K_{\Gamma}^*(t) = \frac{1}{t} \int_0^t K_{\Gamma}(x) dx.$$

Статистичну оцінку цієї характеристики знаходять за формулами

$$\bar{K}_{\Gamma}^*(t) = \frac{\bar{T}_{\text{н.сум}}(t)}{\bar{T}_{\text{н.сум}}(t) + \bar{T}_{\text{в.сум}}(t)}; \quad \bar{T}_{\text{н.сум}}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{T}_{\text{н.сум}}(t)}{n(t)}; \quad \bar{T}_{\text{в.сум}}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{T}_{\text{в.сум}}(t)}{n(t)},$$

де $T_{\text{н.сум}}(t)$ і $T_{\text{в.сум}}(t)$ – сумарний наробіток і сумарний час відновлення i -го об'єкта в інтервалі $(0, t)$; N – кількість випробовуваних об'єктів; $n(t)$ – сумарна кількість відмов за час t . Очевидно, що якщо функція $K_{\Gamma}(t)$ монотонно спадає, середнє значення коефіцієнта готовності $K_{\Gamma}^*(t) > K_{\Gamma}(t)$. Крім того, виконується співвідношення

$$K_{\Gamma} = \lim_{i \rightarrow \infty} K_{\Gamma}^*(t) = \frac{\bar{T}_{\text{н}}}{(\bar{T}_{\text{н}} + \bar{T}_{\text{в}})}, \quad (1.31, \text{ а})$$

де $\bar{T}_{\text{н}}$ – середній наробіток на відмову; $\bar{T}_{\text{в}}$ – середній час відновлення.

Для оцінювання надійності об'єктів, що працюють у режимі БРЦЗ із тривалістю одного циклу t , використовують комплексний показник – коефіцієнт оперативної готовності у двох варіантах.

Нестационарний коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{оп.г}}(\tau, t)$ є ймовірністю того, що об'єкт виявиться у працездатному стані у момент τ періоду використання за призначенням й буде працювати безвідмовно ще протягом заданого інтервалу часу (заданого наробітку) t . Зі збільшенням τ залежність від моменту надходження заявки на виконання ремонтних робіт зменшується, і функція $K_{\text{оп.г}}(\tau, t)$ асимптотично наближається до $K_{\text{оп.г}}(t)$ – стаціонарного коефіцієнта оперативної готовності або просто коефіцієнта оперативної готовності:

$$K_{\text{оп.г}}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\text{оп.г}}(\tau, t).$$

Коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{оп.г}}(t)$ є ймовірністю того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, і, починаючи із цього моменту, буде працездатним ще протягом заданого часу (заданого наробітку). Зв'язок між показниками надійності можна виразити формулами

$$\begin{aligned} K_{\text{оп.г}}(\tau, t) &= K_{\text{г}}(\tau)P(t|\tau); \quad K_{\text{оп.г}}(t) = K_{\text{г}}P_0(t); \\ K_{\text{г}}(\tau) &= K_{\text{оп.г}}(\tau, 0); \quad K_{\text{г}} = K_{\text{оп.г}}(0); \quad P(t) = K_{\text{оп.г}}(0, t). \end{aligned} \quad (1.32)$$

Імовірність $P_0(t)$ відрізняється від імовірності безвідмовної роботи $P(t)$, отриманої з формули (1.1), оскільки у режимі БРЦЗ до моменту подання заявки об'єкт якийсь час був працездатним. Тому

$$P_0(t) = P(T'_0 > t),$$

де T'_0 – залишковий час безвідмовної роботи.

Наступні два показники надійності використовують тоді, коли в об'єкті можуть виникати приховані відмови, тобто коли система контролю й діагностування (СКД) неідеальна і не забезпечує миттєвого й достовірного виявлення відмов.

Коефіцієнт контрольованої готовності $K_{\text{к.г}}$ є ймовірністю того, що, відповідно до показань СКД, об'єкт працездатний у довільний

момент часу періоду використання за призначенням. За допомогою середніх значень інтервалів можна знайти $K_{к.г}$ за формулою

$$K_{к.г} = \frac{\bar{T}_н + \bar{T}_{п.сер}}{\bar{T}_н + \bar{T}_{п.сер} + \bar{T}_в},$$

де $\bar{T}_н$ – середній наробіток до відмови; $\bar{T}_в$ – середній час відновлення; $\bar{T}_{п.сер}$ – середній час перебування у стані прихованої відмови. За тих самих умов коефіцієнт готовності

$$K_г = \frac{\bar{T}_н}{\bar{T}_н + \bar{T}_{п.сер} + \bar{T}_в}.$$

Звідси слідує, що $K_{к.г} > K_г$.

Імовірність безвідмовного застосування $P_3(t)$ є ймовірністю того, що до наробітку t прихована відмова не з'явиться за умови, що її не було в початковий момент часу. З визначення слідує формула зв'язку

$$K_{оп.г}(t) = K_{к.г} P_3(t). \quad (1.33)$$

Порівнюючи формули (1.32) та (1.33), отримаємо

$$P_3(t) = \frac{K_г P_0(t)}{K_{к.г}}. \quad (1.33a)$$

Очевидно, що $P_3(t) \leq P_0(t)$. Рівняння справджується тільки якщо $T_{п.сер} = 0$.

Для об'єктів, що допускають у процесі експлуатації планове технічне обслуговування, вводиться ще один показник – коефіцієнт технічного використання.

Коефіцієнт технічного використання $K_{т.вк}$ є відношенням математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані $\bar{T}_{н.сум}$ за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані й простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням $\bar{T}_{т.об}$ і ремонтом $\bar{T}_{р.об}$ за той самий період:

$$K_{\text{т.вк}} = \frac{\bar{T}_{\text{н.сум}}}{\bar{T}_{\text{н.сум}} + \bar{T}_{\text{т.об}} + \bar{T}_{\text{р.об}}}. \quad (1.34)$$

Статистичною оцінкою $K_{\text{т.вк}}$ під час спостереження за N об'єктами є співвідношення

$$\bar{K}_{\text{т.вк}} = \frac{T_{\text{н.сум}}(N)}{T_{\text{н.сум}}(N) + T_{\text{т.об}}(N) + T_{\text{р.об}}(N)};$$

$$T_{\text{н.сум}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{н.сум}i}; \quad T_{\text{т.об}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{т.об}i}; \quad T_{\text{р.об}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{р.об}i},$$

де $T_{\text{н.сум}i}$, $T_{\text{т.об}i}$, $T_{\text{р.об}i}$ – сумарні значення фактичного наробітку, часу відновлення й часу технічного обслуговування i -го екземпляра об'єкта.

1.4. Приклади розв'язання задач

Приклад 1.1. Дано систему, що складається з двох елементів E_1 та E_2 (рис. 1.9).

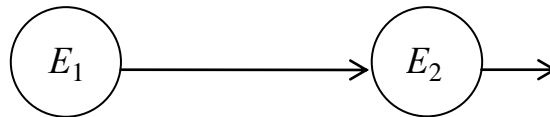


Рис. 1.9. Система, що складається з двох одиночних послідовно сполучених елементів E_1 та E_2

Потрібно, використовуючи логічні союзи (символи), записати умову відмови цієї системи \bar{C} .

Р о з в' я з а н н я. Умова відмови цієї системи \bar{C} може бути сформульована у формі складної події: «якщо відмовив перший елемент і працездатний другий елемент, або відмовив другий елемент і працездатний перший елемент, або відмовили перший і другий елементи, то відмовила система». Позначимо подію «відмова якого-небудь i -го елемента» через \bar{E}_i . Тоді на підставі розглянутих співвідношень між

подіями умову відмови системи можна записати у вигляді такої логічної рівності:

$$\bar{C} = (\bar{E}_1 \wedge E_2) \vee (E_1 \wedge \bar{E}_2) \vee (\bar{E}_1 \wedge \bar{E}_2),$$

де E_1, E_2 – події, які полягають у тому, що об’єкти 1 і 2 відповідно працездатні, \bar{E}_1, \bar{E}_2 – події, які полягають у тому, що об’єкти 1 і 2 відповідно відмовили.

Приклад 1.2. Для умов прикладу 1.1 написати рівняння ймовірності перебування системи у будь-якому можливому стані.

Р о з в’ я з а н н я. У процесі експлуатації система C може перебувати в одному і лише в одному з чотирьох можливих станів:

- відмови першого елемента і працездатності другого елемента;
- відмови другого елемента і працездатності першого елемента;
- відмови першого і другого елементів разом;
- працездатності першого і другого елементів, тобто у стані працездатності всієї системи в цілому.

Ці стани системи складають повну групу подій. Оскільки система обов’язково перебуватиме тільки в одному з можливих станів, то ця складна подія достовірна і, оскільки сума ймовірностей несумісних подій, що створюють повну групу, дорівнює одиниці, запишемо шукане рівняння:

$$\begin{aligned} P(\bar{C}) + P(C) &= P(\bar{E}_1 \wedge E_2) + P(E_1 \wedge \bar{E}_2) + P(\bar{E}_1 \wedge \bar{E}_2) + P(E_1 \wedge E_2) = \\ &= P(\bar{E}_1) \cdot P(E_2) + P(E_1) \cdot P(\bar{E}_2) + P(\bar{E}_1) \cdot P(\bar{E}_2) + P(E_1) \cdot P(E_2) = 1 \end{aligned}$$

або $P(\bar{C}) + P(C) = 1$.

Приклад 1.3. На літаках встановлено однотипні (однакові) агрегати авіаційної групи виробництва трьох заводів, причому агрегатів 1-го заводу – 20 %; 2-го заводу – 30 % і 3-го заводу – 50 %. Ймовірності безвідмовної роботи агрегатів, виготовлених на заводах 1, 2 і 3-му відповідно дорівнюють 0,9; 0,92; 0,808. Відмова бортової системи трапилась через відмову саме цього агрегату. Яка ймовірність того, що агрегат, який відмовив, вироблений на 1, 2 і 3-му заводах відповідно?

Р о з в’ я з а н н я. 1. За умовою задачі маємо:

а) ймовірності того, що агрегат, який відмовив, належить до першого, другого і третього заводів

$$P(H_1) = 0,2; P(H_2) = 0,3; P(H_3) = 0,5;$$

б) умовні ймовірності того, що система літака відмовила через відмову агрегату з першого заводу $P(\bar{A}|H_1) = 1 - P(A|H_1) = 1 - 0,9 = 0,1$; з другого – $P(\bar{A}|H_2) = 1 - P(A|H_2) = 1 - 0,92 = 0,08$ і з третього – $P(\bar{A}|H_3) = 1 - P(A|H_3) = 1 - 0,808 = 0,192$, де A – це подія, яка визначає безвідмовну роботу всієї бортової системи, $P(A|H_1)$, $P(A|H_2)$ і $P(A|H_3)$ – умовні ймовірності безвідмовної роботи системи за умови безвідмовної роботи агрегату з першого, другого і третього заводів відповідно.

2. За формулою повної ймовірності [2]

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \wedge H_i) = \sum_{i=1}^3 P(H_i)P(A|H_i)$$

вирахуємо ймовірність безвідмовної роботи системи літака за показниками безвідмовності агрегатів цього типу:

$$P(A) = 0,2 \cdot 0,9 + 0,3 \cdot 0,92 + 0,5 \cdot 0,808 = 0,86.$$

3. Ймовірність відмови системи літака через відмову агрегату цього типу – це ймовірність протилежної події, тобто

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) = 1 - 0,86 = 0,14.$$

4. За формулою Байєса [2], тобто з урахуванням того, що

$$P(H_i | \bar{A}) = \frac{P(H_i) \cdot P(\bar{A} | H_i)}{P(\bar{A})},$$

розраховуємо ймовірності того, що той агрегат, який відмовив, вироблений відповідно на 1, 2 і 3-му заводах:

$$P(H_1 | \bar{A}) = \frac{0,2 \cdot 0,1}{0,14} = 0,143;$$

$$P(H_2 | \bar{A}) = \frac{0,3 \cdot 0,08}{0,14} = 0,171;$$

$$P(H_3 | \bar{A}) = \frac{0,5 \cdot 0,192}{0,14} = 0,686.$$

Приклад 1.4. У 52 авіаційних двигунів, що перебували в експлуатації, було зафіксовано три відмови, які потребують дострокового зняття їх з літака. Час спостереження $t = 500$ годин. Визначити оцінку середнього наробітку до відмови \hat{T}_0 , який приводить до дострокового зняття авіадвигуна, та оцінку параметра потоку відмов $\hat{\omega}(t)$.

Р о з в' я з а н н я. Згідно з рівняннями (1.20) та (1.29) отримаємо оцінку $\hat{T}_0 = \frac{Nt}{n}$, де N – загальна кількість двигунів; n – кількість відмов.

Тоді з урахуванням даних задачі $\hat{T}_0 = \frac{52 \cdot 500}{3} = 8666$ год.

Для оцінювання параметра потоку відмов використаємо формули (1.27) і (1.28). Тоді $\hat{\omega}(t) = \frac{1}{\hat{T}_0} = \frac{1}{8666} = 0,11 \cdot 10^{-3}$.

Приклад 1.5. Під час експлуатації літаків АН-24 за один квартал трапилось три несправності електромеханізму МВР-2М, які виявлені у процесі післяпольотного обслуговування. Сумарна тривалість польотів $t_{\Sigma} = 60000$ год. Визначити статистичну оцінку наробітку до відмови \hat{T}_0 .

Р о з в' я з а н н я. Знайдемо оцінку $\hat{T}_0 = \frac{t_{\Sigma}}{n}$, де n – кількість відмов електромеханізму під час польотів загальною тривалістю t_{Σ} . Тоді

$$\hat{T}_0 = \frac{60000}{3} = 20000 \text{ год.}$$

Приклад 1.6. Під час проведення дослідження працездатності десяти однотипних виробів фіксують їх наробіток, за якого виникає перша відмова від зношуваності або утомленості і який вважають моментом досягнення виробом граничного стану: $T_1 = 1020$ год; $T_2 = 910$ год; $T_3 = 980$ год; $T_4 = 1110$ год; $T_5 = 1090$ год; $T_6 = 890$ год; $T_7 = 970$ год; $T_8 = 1050$ год; $T_9 = 860$ год; $T_{10} = 990$ год. Потрібно визначити середній термін служби цього виробу.

Р о з в' я з а н н я. З параграфів 1.2.4 та 1.2.5 можна визначити, що середній термін служби виробу становить

$$TC = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n},$$

де n – загальна кількість відмов виробу. Тоді згідно з отриманими під час дослідження даними

$$TC = \frac{1020 + 910 + 980 + 1110 + 1090 + 890 + 970 + 1050 + 860 + 990}{10} = 987 \text{ год.}$$

Приклад 1.7. За рік експлуатації авіаційний двигун пропрацював на землі і в повітрі 820 год. За цей період на ньому було виявлено чотири відмови і пошкодження, на знаходження та усунення яких було

витрачено 22 год. На проведення регламентних робіт за той самий термін експлуатації витрачено 34 год. Знайти коефіцієнт технічного використання двигуна.

Р о з в' я з а н н я. Згідно з формулою (1.34),

$$K_{\text{т.вк}} = \frac{\bar{T}_{\text{н.сум}}}{\bar{T}_{\text{н.сум}} + \bar{T}_{\text{т.об}} + \bar{T}_{\text{р.об}}}, \text{ де } \bar{T}_{\text{н.сум}} - \text{сумарний час перебування двигуна}$$

у працездатному стані за весь період (один рік) експлуатації, $\bar{T}_{\text{р.об}}$, $\bar{T}_{\text{т.об}}$ – математичне сподівання часу перебування об'єкта у простої, обумовленому ремонтом і технічним обслуговуванням за той самий період відповідно. Тоді

$$K_{\text{т.вк}} = \frac{820}{820 + 22 + 34} = 0,93.$$

1.5. Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення поняття надійності. Назвіть три особливості цього поняття.

2. Назвіть одиничні властивості надійності та їх визначення.

3. Що таке відмова і збій? Які є різновиди відмов і збоїв?

4. Що таке елемент і система? У чому полягає діалектика взаємозв'язку цих понять?

5. Назвіть одиничні й комплексні показники надійності. У чому полягає їх взаємозв'язок? Дайте імовірнісні й статистичні визначення показників надійності.

6. Назвіть показники надійності невідновлюваних об'єктів.

7. Назвіть показники надійності відновлюваних об'єктів.

8. Яким чином пов'язані між собою показники безвідмовності?

9. Назвіть кількісні показники довговічності.

10. Дайте визначення поняття збережуваності. Назвіть її ймовірнісні показники.