

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

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Надійність авіаційної техніки»  
вибіркових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**272 Авіаційний транспорт**  
**Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів**

**темою №1 – Основні поняття та визначення.**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

2

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою Кременчуцького  
льотного коледжу Харківського  
національного університету  
внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 № 1

**Розробники:**

1. *Старший викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист, Владов С.І.*
2. *Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, викладач-спеціаліст Самохліб Олександр Олександрович*

**Рецензенти:**

1. *Завідувач кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, доктор технічних наук, професор Мороз М.М.*
2. *Викладач циклової комісії аеронавігації КЛК ХНУВС, к.т.н., с.н.с. 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 література:

1. Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 240 с.

#### Допоміжна література:

2. Міляєв Ю. П., Нечипоренко О. М. Основи надійності технічних систем : навчальний посібник. Київ : Видавн.-полігр. центр Акад. муніцип. управління, 2010. 246 с.

### Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/11582/7/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0%20%D0%B2.pdf>

### Текст лекції

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, використовуваних 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*.

#### **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 її 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.).

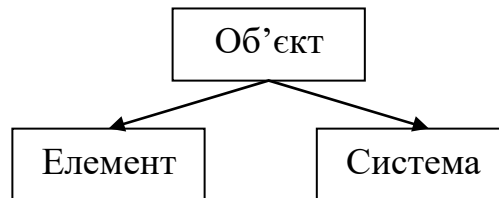


Рис. 1.1. Зв'язок між об'єктом, елементом і системою з погляду теорії надійності

*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 тойсамий 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.

### 1.1.1. 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 пасажирів) – 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 покриття 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 устанавлюється 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).

### 1.1.2. 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, пробої 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 інезалежністю 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 немінучими 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 багатофункціональній 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 регуляторів, 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 усунути 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 (ремонтний) об'єкт* – це об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною, ремонтною і/або конструкторською (проектною) документацією. За аналогією

*неремонтпридатний (неремонтний) 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 досліду, і неможливою, якщо вона не може відбутися (з'явитися) у результаті цього досліду. Подію, яка в результаті цього досліду 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 досліджу. 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 досліджу, 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 вибірових 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;
- ремонтпридатність;
- 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 ремонтпридатність

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 відрізнятися 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.