

**В.І. Бурлаков, С.В. Ленков,
Р.М. Салімов**

**ОСНОВИ ТЕОРІЇ
НАДІЙНОСТІ
ПОВІТРЯНИХ СУДЕН
ТА АВІАЦІЙНИХ
ДВИГУНІВ**

Навчальний посібник

Київ 2004

Р.М.Салімов

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

В.І.Бурлаков, С.В.Ленков, Р.М.Салімов

Основи теорії надійності повітряних суден та авіаційних двигунів

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*

***70-річчю Національного
авіаційного університету
присвячується***

Київ 2004

УДК 629.735.017.1 (075.8)

ББК 052-021.1 я 73-1

Б 915

Рецензенти: *Збруцький О.В.* – д-р техн.наук, завідувач кафедри приладів і систем управління літальними апаратами Національного технічного університету України "КПІ"; *Сікорський Є.О.* – канд.техн.наук, начальник відділу науково-технічного розвитку та програм УкрЦЕАТ

Бурлаков В.І., Ленков С.В., Салімов Р.М.

Б915

Основи теорії надійності повітряних суден та авіаційних двигунів: Навч. посібник. – К.: НАУ, 2004. – 172 с.

ISBN 966-598-167-6

Гриф надано Міністерством освіти і науки України, лист за № 14/18.2-2079 від 8 листопада 2002 року.

У навчальному посібнику, написаному відповідно до програми навчальної дисципліни, розглянуті методи обробки та аналізу експлуатаційної інформації, принципи побудови моделей відмов й оцінки показників надійності виробів АТ, наведені рекомендації щодо вибору та обґрунтування діагностичних параметрів об'єктів експлуатації тощо.

Викладені методологічні та організаційно-технічні принципи рішення конкретних завдань забезпечення надійності виробів АТ на різноманітних стадіях їхнього життєвого циклу.

Поряд з традиційними засобами та принципами дослідження надійності виробів подані засоби рішення інженерних задач, що відображають специфічні особливості створення та експлуатації АТ.

Призначений для студентів спеціальності 8.100106 "Виробництво, технічне обслуговування та ремонт авіаційної техніки" денної та заочної форм навчання.

ISBN 966-598-167-6

УДК 629.735.017.1 (075.8)

ББК 052-021.1 я 73-1

©В.І.Бурлаков, С.В.Ленков,

ВСТУП

Зростання ролі надійності технічних систем у забезпеченні безпеки польотів повітряних суден (ПС) привертає особливу увагу вітчизняних та зарубіжних дослідників до проблеми забезпечення надійності виробів авіаційної техніки (АТ) та комплексного її вирішення на різноманітних етапах життєвого циклу виробів.

Ускладнення конструкцій виробів і систем АТ, збільшення виконуваних ними функцій, автоматизація управління і функціонування складних авіаційних систем, застосування більш навантажених режимів роботи виробів істотно загострили проблему забезпечення безпеки та регулярності польотів, рівень яких у значній мірі визначається надійністю систем ПС. Низька надійність систем ПС призводить до збитків, які пов'язані з витратами на запасні частини, ремонтне устаткування, простоем об'єктів у непрацездатному стані, утримання технічного персоналу тощо.

Збільшення складності сучасної АТ зумовило також зростання витрат на технічне обслуговування (ТО). Значно ускладнились процеси визначення технічного стану функціональних систем та своєчасного виявлення несправності ПС, що ускладнює запобігання небезпечних наслідків відмов у польоті.

За цих умов система ТО стає одним із найважливіших чинників, що визначають ефективність експлуатації та безпеки польотів ПС. Удосконалення системи ТО, розробка та впровадження ефективних засобів діагностування виробів АТ, підвищення якості їхнього технічного обслуговування здійснюються більш ефективно, якщо рішення вказаних задач ґрунтується на аналізі надійності, вивченні механізму та характеру виникнення відмов, аналізі зміни фізико-хімічних властивостей матеріалів, аналізі зміни технічного стану виробів АТ у процесі експлуатації тощо.

Подальше підвищення інтенсивності використання ПС при одночасному зниженні витрат на їхню експлуатацію передбачає застосування таких засобів ТО, що забезпечували б максимальне використання індивідуальних можливостей виробів АТ.

Основою цих засобів є проведення робіт з ТО залежно від технічного стану об'єктів експлуатації, рівня їхньої надійності, функціональної значущості.

При цьому є необхідною розробка ефективних засобів контролю та діагностування АТ, автоматизація процесів технічної експлуатації ПС, підвищення кваліфікації інженерно-технічного складу і т.ін.

Управління технологічними процесами в експлуатації пов'язане з виявом найбільш раціональних керуючих впливів, для розробки яких застосовується системний підхід, аналіз, математичне моделювання. Керувати процесами у повсякденній практиці можливо при наявності відповідної системи збирання, обробки та аналізу інформації, а також реалізації рішень, що приймаються за результатами аналізу цієї інформації.

Автоматизація виробничих процесів, впровадження нових засобів діагностування технічного стану виробів, використання прогресивних стратегій ТО висувають високі вимоги до надійності виробів АТ та їхніх експлуатаційних характеристик, ремонтпридатності та експлуатаційної технологічності, що дає значний економічний ефект на стадії експлуатації.

З ускладненням конструкцій ПС та авіаційних двигунів (АД), інтенсифікації процесів, застосування нових засобів діагностування та контролю стану виробів АТ якість ТО все в більшій мірі визначається суб'єктивними факторами особливо в тих видах виробничої діяльності, де навіть невелика помилка робітника, обумовлена нестійкою увагою, невмінням швидко приймати правильні рішення призводить до тяжких наслідків чи великих економічних витрат. Таким чином, проблема забезпечення надійності АТ містить низку аспектів, що визначають ефективність використання та безпеку польотів ПС.

Фізичний аспект, що охоплює створення, вдосконалення та вибір нових матеріалів, пошук та реалізацію нових фізичних принципів роботи виробів АТ, вивчення механізмів формування відмов об'єктів експлуатації, оптимізацію режимів роботи виробів, тощо.

Схемний аспект, який охоплює принципи, засоби організації та використання структурного резервування функціональних систем АТ, включаючи види, режими та кратність резервування.

Інформаційний аспект містить принципи та засоби збирання, зберігання, обробки та аналізу експлуатаційної інформації для керування надійністю виробів АТ та прийняття оптимальних рішень в процесі їхньої експлуатації. До інформаційного аспекту

слід віднести також питання розробки та впровадження автоматизованих систем та їхнього математичного забезпечення.

Технологічний аспект надійності включає в себе вибір та вдосконалення технологічних процесів, послідовність та якість виконання операцій, що застосовують технічні засоби контролю.

Сукупність принципів, засобів виявлення та пошуку відмов і пошкоджень у процесі експлуатації АТ складає основу діагностичного аспекту забезпечення надійності. В рамках діагностичного аспекту забезпечення надійності АТ вирішуються питання визначення технічного стану об'єктів експлуатації, а також питання організації ТО, оптимізації режимів перевірки справності та якості функціонування систем АТ, розробки алгоритмів пошуку елементів, що відмовили, і т.ін. Проведення ТО ПС, пошук та відновлення елементів складних систем АТ, потребує матеріальних витрат, що знижує ефективність їхнього використання.

Скорочення експлуатаційних витрат та підвищення готовності об'єктів експлуатації до використання лежать в основі економічного аспекту надійності.

Важливе значення для забезпечення безпеки польотів має ергатичний аспект надійності, який враховує участь у функціонуванні систем АТ та їхнього ТО людини-оператора.

Зазначені аспекти взаємопов'язані між собою та потребують системного підходу під час дослідження надійності АТ.

Розробка та створення надійної АТ з високими якісними показниками неможливі без розвитку науки про надійність, яка вивчає закономірності виникнення відмов та пошкоджень виробів та засоби їхнього прогнозування; опрацьовує засоби підвищення надійності виробів на етапі проектування, забезпечення на етапі виготовлення об'єктів та підтримці надійності при експлуатації; удосконалює засоби розрахунку надійності виробів та її контролю в експлуатації.

Теорія надійності розглядає кількісні показники надійності, на основі аналізу яких вивчає зміну станів виробів з часом та опрацьовує правила прийняття оптимальних рішень для забезпечення заданого рівня надійності технічних об'єктів у процесі тривалого використання їх за призначенням.

Наука про надійність не змогла й не може розвиватися без дослідження фізико-хімічних процесів. Тому значна увага приділя-

ється вивченню фізичних причин відмов, впливу старіння й міцності матеріалів на надійність, різноманітних зовнішніх та внутрішніх впливів на працездатність об'єктів. Сукупність робіт в галузі дослідження фізико-хімічних процесів, що зумовлюють надійність об'єктів, стала основою *фізичної теорії надійності*.

Обробка статистичних матеріалів з надійності техніки зумовила розвиток існуючих статистичних методів й призвела до накопичення великої кількості статистичної інформації з надійності об'єктів експлуатації.

Узагальнення статистичних матеріалів про відмови та розробка рекомендацій з підвищення надійності об'єктів зумовили необхідність визначення математичних закономірностей, котрим підкоряються відмови, а також розроблення методів кількісного вимірювання надійності та інженерних розрахунків її показників. В результаті утворилася *математична теорія надійності*.

У різних областях техніки розробляються прикладні питання забезпечення надійності конкретної техніки. При цьому вирішуються питання про найбільш раціональне використання загальної теорії надійності в конкретній галузі техніки й ведеться розробка нових положень, методів та засобів, що відображають специфіку даного виду техніки. Так виникли прикладні теорії надійності, в тому числі *прикладна теорія надійності АТ*.

Знання головних положень теорії надійності дозволить авіаційним фахівцям вибирати оптимальні режими роботи елементів, виробляти засоби упередження відмов на основі побудови математичних моделей, аналізі зміни певних параметрів у процесі експлуатації, техніко-економічних розрахунків, удосконалювати технології та організацію ТО, розробляти та застосовувати засоби діагностування виробів АТ та вирішувати питання оптимізації інших факторів, спільна дія яких визначає надійність АТ та безпеку польотів.

1. НАДІЙНІСТЬ ЯК КОМПЛЕКСНА ВЛАСТИВІСТЬ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

1.1. Терміни та визначення основних понять у теорії надійності

Теорія надійності ґрунтується на низці вихідних понять, точність розуміння яких та використання термінів і визначень є необхідною умовою для інженерних та теоретичних досліджень, практичного впровадження заходів щодо забезпечення надійності об'єкта експлуатації.

Об'єкт – це система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функціональна одиниця, пристрій, елемент чи будь-яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця.

Об'єкт може включати технічні засоби, технічний персонал чи будь-які їх поєднання. Сукупність об'єктів, об'єднаних спільним призначенням і метою функціонування, може розглядатися як об'єкт.

Найбільш загальною властивістю будь-якого об'єкта вважається поняття якості.

Якість об'єкта - це сукупність властивостей об'єкта, що обумовлює його придатність до використання за призначенням та відповідність усім встановленим вимогам, які наведені у технічній документації.

Найважливішою властивістю цієї сукупності є надійність.

Надійність - властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування ТО, зберігання та транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об'єкта і умов його застосування, може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей.

Безвідмовність - властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Довговічність - властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі ТОіР.

Ремонтопридатність - властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою ТОіР.

Збережуваність - властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції під час і після зберігання та (чи) транспортування.

У теорії надійності розрізняють системи та елементи. Під системою розуміють сукупність спільно діючих елементів, що забезпечують рішення певних завдань. Елемент не має самостійного експлуатаційного призначення при рішенні конкретного завдання і виконує певні функції системи. Ці поняття відносні, вони визначаються поставленими цілями дослідження. Так, при дослідженні надійності авіаційних двигунів як системи її елементами є компресор, турбіна, камера згоряння, паливна автоматика, система управління двигуном тощо. У той же час при дослідженні надійності літака авіаційний двигун розглядають як елемент.

Для характеристики стану об'єктів експлуатації застосовують такі терміни, як **справність, несправність, працездатний чи непрацездатний стан**. Кожний з цих станів характеризується сукупністю значень параметрів та якісних ознак, що встановлюються нормативно-технічною або конструкторською документацією. Працездатний об'єкт на відміну від справного задовольняє лише вимогам нормативно-технічної документації, виконання яких забезпечує його здатність виконувати потрібні функції. У зв'язку з цим "справний стан" ширше, ніж поняття "працездатний стан".

Об'єкт може бути несправним, але працездатним.

Під **граничним станом** розуміють такий стан об'єкта, при якому подальша експлуатація згідно з нормативно-технічною документацією неприпустима чи недоцільна, або характеризується виходом параметрів за встановлені межі. Після настання

граничного стану експлуатація об'єкта припиняється і його можуть направити в ремонт або списати.

Основним поняттям в теорії надійності є **відмова** - подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

Якщо об'єкт переходить у несправний, але працездатний стан, цю подію називають **пошкодженням**. Схема змінювання станів об'єкта залежно від подій наведена на рис.1.1.

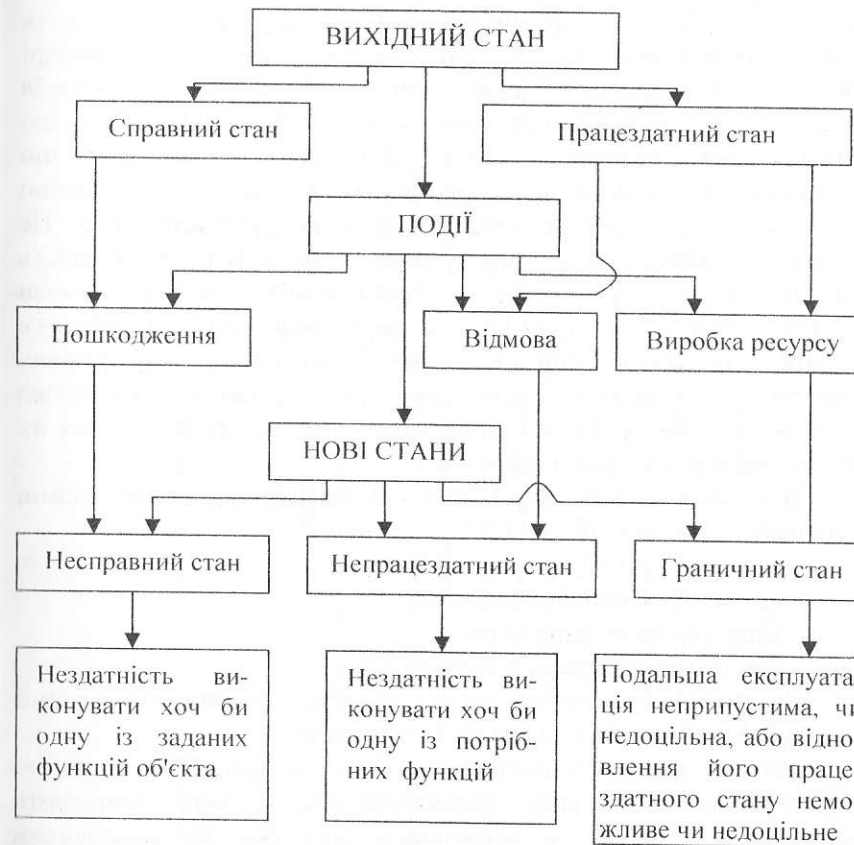


Рис.1.1. Схема станів об'єкта

Перехід об'єкта із непрацездатного стану у працездатний здійснюють при відбудові чи ремонті об'єкта. Залежно від особливостей конструкції об'єктів експлуатації нормативно-технічною документацією об'єкт визначають як такий, що ремонтують або не ремонтують, який обслуговують або не обслуговують. Розподіл об'єктів на такі, що ремонтуються і не ремонтуються, пов'язаний з можливістю та економічною доцільністю поновлення їхнього ресурсу ремонтом. Якщо передбачається виконання ТО об'єктів у процесі експлуатації, то вони є ще й обслуговуваними. Об'єкти, які обслуговують, можуть бути і неремонтовними об'єктами. Істотне значення при виборі показників надійності та їхньому обчисленні має розподіл об'єктів на такі, що відновлюються і не відновлюються. Об'єктом, що відновлюється, називають об'єкт, для якого у ситуації, що розглядається, відновлення працездатного стану передбачено нормативно-технічною та конструкторською документацією. Це визначення характеризує не фізичну чи дійсну можливість ремонту, а модель об'єкта в експлуатації, прийняті умови спостереження та реєстрації моментів відмов. Під відновленням розуміють не тільки ремонт тієї чи іншої частини виробу, а й повну його заміну. У зв'язку з цим деякі об'єкти, що є принципово неремонтовними, можуть у конкретній ситуації розглядатися як такі, що відновлюються, і навпаки.

Всі види відмов виробів АТ класифікують за ознаками, основними з яких є (табл. 1.1):

- характер зміни параметра об'єкта;
- причини виникнення відмови;
- характер виявлення відмов;
- взаємозалежність між відмовами.

Залежно від характеру зміни параметрів об'єкта експлуатації відмови класифікують на раптові та поступові.

Раптові відмови характеризуються стрибкоподібною зміною одного чи кількох заданих параметрів об'єкта. Вони виникають внаслідок поєднання несприятливих факторів та випадкових зовнішніх впливів, навантажень, що перевищують розрахункові значення.

Таблиця 1.1

Класифікація відмов об'єктів

Ознака класифікації	Види відмов	Визначення поняття	Приклади
Характер зміни параметра об'єкта	Раптові	Відмова, яка характеризується зміною значень заданих параметрів об'єкта у вигляді стрибків	Забойна лопатки І-го ступеня компресора. Руйнування авіащини при посадці ЛА
	Поступові	Відмова, яка характеризується поступовою зміною одного або декількох заданих параметрів	Зростання люфту в шарнірних з'єднаннях поршневих пар аксально-поршневого гідронасоса. Тріщина кронштейна системи керування ЛА
Причина виникнення відмови	Конструкційна	Відмова, яка виникає через недосконалість або порушення встановлених правил й (або) норм конструювання об'єкта	Тріщини обшивки стабілізатора. Підвищення люфтів, зростання тертя і заїдання підшипників тяг та качалок. Руйнування тросової проводки управління двигуном
	Виробнича	Відмова, яка виникла через недосконалість або порушення встановленого процесу виготовлення та ремонту об'єкта, що виконується на ремонтному підприємстві	Внутрішня негерметичність паливно-малярних радіаторів. Руйнування шарнірних з'єднань поршневих пар аксально-поршневого насоса. Негерметичність паливних баків-кесонів

Ознака класифікації	Види відмов	Визначення поняття	Приклади
Характер виявлення відмов	Експлуатаційна	Відмова, яка виникла через порушення встановлених правил й умов експлуатації об'єкта	Руйнування авіацін. Відмова елементів системи регулювання паливом ГТД. Відмова паливного фільтра
	Явна	Виявляється технічним персоналом під час підготовки чи функціонування об'єкта	Руйнування підшипників ГТД. Помпаж компресора ГТД. Забивання сітки паливного фільтра. Забоїни лопаток 1-го ступеня компресора ГТД
Залежність відмов	Прихована	Самостійно не проявляється в процесі функціонування й потребує для виявлення використання методів і засобів діагностування	Внутрішня негерметичність гідросистеми з насосом змінної подачі. Відмова одного гідроаккумулятора
	Залежна	Відмова об'єкта, яка зумовлена відмовою іншого об'єкта	Руйнування вузла паливного насоса високого тиску через відмову підкачувального насоса Руйнування манжетного ущільнювача гідронасоса через руйнування підшипника привода
	Незалежна	Відмова об'єкта, яка не зумовлена відмовою іншого об'єкта	Корозія зовнішньої поверхні обшивки фюзеляжу. Послаблення болтових та заклепаних з'єднань

Основною ознакою раптової відмови є незалежність наробітку до відмови від тривалості експлуатації виробу. Раптову відмову неможливо передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом.

Поступова відмова спричинена поступовими змінами значень одного чи декількох параметрів об'єкта. Вони пов'язані з процесами зношування, корозії, втоми та повзучості матеріалів.

За причинами виникнення відмови поділяють на конструкційні, виробничі та експлуатаційні.

Відмови, зумовлені відмовами інших елементів, називають залежними. Відмови, що виникли незалежно від справного стану інших елементів, називають незалежними.

У цивільній авіації (ЦА) для виключення тяжких наслідків відмов виробів АТ широко використовують резервування як систем в цілому, так і окремих елементів.

Застосування резервування для забезпечення безпеки польотів допускає експлуатацію виробів до більш високих значень інтенсивності відмов, що призводить до чималих витрат коштів і часу на забезпечення польотів, зниження ефективності використання ПС та АД. При забезпеченні необхідного рівня надійності виробів АТ необхідно враховувати такі їхні особливості:

- вироби АТ є системами, що ремонтуються, відновлюються та обслуговуються і розраховані на тривале функціонування;
- вироби АТ є багатофункціональними та багатокомпонентними системами, до складу яких входять різноманітні технічні пристрої (механічні, електромеханічні, електронні і т.ін.);
- у виконанні тієї чи іншої функції беруть участь декілька різноманітних компонентів, водночас один і той самий компонент може брати участь у виконанні деяких функцій системи;
- рівень надійності виробів АТ значною мірою визначає економічну ефективність використання ПС та АД.

1.2. Надійність авіаційної техніки та безпека польотів

Для літаків ЦА єдиними нормами льотної придатності цивільних транспортних літаків встановлено вимоги, відповідно до

стандартів ІСАО, з безпеки польотів, що стосуються літака, його двигунів та обладнання. Єдиними нормами встановлені такі особливі ситуації, які виникають у польоті: катастрофічна, аварійна, складна та ускладнення умов польоту.

Для кількісної оцінки виникнення особливої ситуації використовують імовірність появи події у польоті з технічних причин за очікуваних умов експлуатації при діях екіпажу відповідно до керівництва з льотної експлуатації. Вимоги встановлені як на літак у цілому, так і на функціональні системи (табл.1.2).

Таблиця 1.2

Припустима імовірність виникнення особливих ситуацій у польоті (на одну годину польоту)

Об'єкт	Ускладнення умов польоту	Складна ситуація	Аварійна ситуація	Катастрофічна ситуація
Літак	10^{-3}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-7}
Функціональна система	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	10^{-9}

Відмови чи поєднання відмов різноманітних елементів функціональних систем можуть призвести до тієї чи іншої особливої ситуації. Найбільш серйозними відмовами, що загрожують безпеці польотів, є:

- руйнування елементів конструкції планера, силових установок, відмови систем управління, паливних, мастильних та гідравлічних систем;
- відмови у каналах інформації та управління польотом, навігаційних систем, у системах комунікації ланцюгів управління та контролю, у тому числі і наземних засобів;
- відмови у системах життєзабезпечення екіпажа та пасажирів, електроенергетичних та інших систем.

Для складних, розгалужених функціональних систем АТ можна визначити велике число комбінацій відмов елементів, що обумовлюють порівняно невелике число функціональних відмов систем. Сукупність різноманітних сполучень відмов елементів, що викликають функціональну відмову системи, визначають з аналізу

її цільового призначення, конструктивних особливостей, а також статистичних даних про результати експлуатації системи.

Тісний зв'язок показників надійності з безпекою польотів та ефективністю використання АТ свідчить про важливість нормування вимог до надійності та її забезпечення у процесі експлуатації. На етапі проектування ПС визначають вимоги до імовірних характеристик окремих функціональних систем та їхніх елементів. Якщо відомі імовірності наслідку кожної відмови чи їхніх комбінацій, то можна розрахувати максимально допустимі значення інтенсивності відмов $\lambda_{i,max}$ елементів функціональної системи, при яких дотримуються сертифікаційні вимоги до літаків.

У процесі експлуатації окремі види відмов збільшуються у зв'язку з тим, що основне завдання експлуатаційного забезпечення полягає у підтримці значень $\lambda_i(t) \leq \lambda_{i,max}$. Одержання і оцінка

λ -характеристик елементів функціональних систем є одним з найважливіших завдань експлуатаційного забезпечення безпеки польотів та формування оптимальних програм ТО ПС.

Рівень надійності виробів АТ та безпеки польотів визначається такими основними факторами:

- надійністю комплектуючих елементів;
- структурною схемою функціональних систем об'єктів експлуатації;
- організаційними формами, режимами та параметрами технічної експлуатації АТ, у тому числі режимами, параметрами та організацією ТО, складом, обсягом, засобом поповнення комплекту запасних елементів, чисельністю, складом та кваліфікацією ремонтно-експлуатаційного персоналу авіаційно-технічних баз та авіаремонтних заводів;
- оснащеністю авіапідприємств цивільної авіації;
- раціональністю розподілу завдань діагностування АТ між наземними та бортовими засобами контролю, режиму діагностування, рівнем кваліфікації персоналу та організацією роботи діагностичних служб;
- умовами експлуатації АТ і т.ін.

Міжнародна авіаційна практика свідчить, що не тільки серйозні відмови функціональних систем, але й незначні збої у

роботі технічних засобів призводять до тяжких наслідків. Так, через перегорання лампочки, що сигналізує про випущене положення шасі, відбулася катастрофа широкофюзеляжного літака L-1011 у районі Флориди. Поки екіпаж, забувши про функціональний розподіл своїх обов'язків, визначав характер несправності, літак урізався у землю, при цьому загинуло понад сто людей. Незважаючи на те, що сучасні ПС обладнані найдосконалішими засобами електронного автоматизованого управління, через ергономічну взаємодію "людина-машина" не забезпечується повна безпека польотів. Авіаційні катастрофи все частіше відбуваються внаслідок помилок членів екіпажу. Так, за даними статистичних досліджень, проведених фахівцями фірми "Боїнг", саме з цієї причини сталося 65% усіх авіаційних пригод у транспортній авіації. Знання конструкції функціональних систем, особливостей характеристик, експлуатаційних обмежень та очікуваних умов експлуатації, у тому числі відмови функціональних систем ПС, сприяють своєчасним та точним діям членів екіпажу щодо попередження відмов. У зв'язку з цим, особливу увагу приділяють розробці логічних схем для опису наступних подій та дій:

- відмов функціональних систем;
- відмов систем енергозабезпечення та переходу на різноманітні джерела авіаційного забезпечення;
- відмов автоматичних систем, що потребують переходу на ручні режими управління;
- дій екіпажу при виникненні небезпечних умов на борту ПС;
- контролю злітно-посадочних пристроїв і т.ін.

Особлива ситуація може виникнути при неспрацюванні сигналізації чи помилковому сигналу. Так, відмова сигналізації аварійного попередження про положення закриттів та передкрилків при зльоті стало причиною загибелі 156 осіб при катастрофі літака MD-80.

Особливі ситуації у польоті також можуть стати наслідком неякісного ТО. З цієї причини відбулися катастрофи літаків L-1011 у Саудівській Аравії, DC-10 у Малайзії, B-747 у Японії, B-737 у Манчестері, Хітроу і т.ін. Зразком неякісного ТО є передумова авіаційної пригоди, коли у польоті послідовно вимкнулися два

двигуни на літаку L-1011 внаслідок витікання масла через монтаж магнітних пробок без ущільнень.

Удосконалення бортових систем автоматичного управління польотом та контролю технічного стану виробів АТ характеризується не тільки збільшенням можливих режимів їхнього функціонування, досягненням підвищеної надійності елементів систем та забезпеченням їхньої високої контролепридатності для своєчасного викриття та локалізації відмов, а й розвитком нового перспективного напрямку на основі їхньої інтелектуалізації, що дозволить послабити вплив "людського фактора" на рівень безпеки польотів.

Таким чином, об'єктивні закономірності розвитку АТ, істотний вплив надійності виробів на ефективність використання АТ та безпеку польотів перетворили проблему забезпечення надійності АТ в одну із найважливіших науково-технічних та соціально-економічних проблем сучасності. Забезпечення надійності АТ здійснюється на всіх етапах життєвого циклу об'єктів експлуатації, а також містить у собі дослідження потреб та формулювання вимог до властивостей надійності АТ та її елементів, вибір економічно оптимального конструктивно-технологічного варіанта виготовлення виробів АТ, планування, організацію та координацію робіт щодо забезпечення оптимально надійної АТ, досягнення економічно оптимальної надійності у процесі виробництва та ремонту АТ, удосконалення організаційно-економічного механізму ефективної реалізації надійності АТ у сфері експлуатації.

1.3. Задачі дослідження надійності АТ та особливості їхнього вирішення в експлуатації

Процеси проектування, виробництва і експлуатації АТ – це низка послідовних стадій робіт, на кожній з яких проводяться дослідження надійності, які супроводжуються вибором і обґрунтуванням сукупності прийнятих рішень.

Головною метою дослідження надійності АТ є розробка заходів, що сприяють підвищенню безпеки і регулярності польотів

та удосконаленню процесів технічної експлуатації АТ, які забезпечують високу ефективність її використання.

Вибір і обґрунтування рішень щодо забезпечення надійності АТ здійснюють з урахуванням різноманітних методів досліджень, розроблених на основі теорії надійності, теорії експлуатації і масового обслуговування, теорії планування експерименту тощо. Ці роботи виконують підрозділи надійності проектно-конструкторських, виробничих і експлуатаційних підприємств, науково-дослідні організації авіаційної промисловості та ЦА.

Для удосконалення процесів проектування і досягнення рівня надійності функціональних систем ПС, що задані у нормах льотної придатності (ЛП), на етапі проектування необхідно:

- теоретично обґрунтувати можливість виконання вимог щодо надійності з урахуванням економічних показників, заданих у ТЗ на розробку функціональної системи;

- визначити варіанти схемно-конструктивної побудови складних систем із заданими характеристиками комплектуючих виробів на основі техніко-економічного розрахунку;

- оцінити збалансованість конструктивних рішень кожного виробу АТ з урахуванням сукупності експлуатаційних факторів;

- розробити заходи щодо підвищення надійності виробів АТ для забезпечення заданого рівня надійності функціональної системи;

- визначити конструктивні заходи, що забезпечують економічність технічної експлуатації виробів АТ;

- здійснити вибір оптимальної системи контролю й діагностування виробів АТ;

- апріорно оцінити ефективність доробку, виходячи з можливості реалізації в експлуатації, тощо;

Поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, математичного й фізичного моделювання дозволяє якомога раціональніше використовувати апріорну та апостеріорну інформації для прийняття якісних поточних і подальших рішень.

В процесі проектування досліджують проектну надійність систем АТ та їхніх елементів. Для цього розробляють моделі оцінки надійності альтернативних варіантів системи, нормування

надійності елементів та здійснюють вибір варіанта, який задовольняє обмеження і вимоги з надійності.

В результаті проектно-конструкторських відпрацювань та проведених досліджень обирають кінцеві варіанти систем, які реалізуються на наступних стадіях життєвого циклу, а також обґрунтовують програму забезпечення надійності АТ.

Програма забезпечення надійності АТ - це документ, що встановлює комплекс взаємообумовлених організаційно-технічних вимог та заходів, які проводять на певних етапах життєвого циклу об'єкта і спрямовані на забезпечення заданих вимог до надійності та (або) на підвищення надійності.

На стадіях розробки ескізного і технічного проектів до заходів щодо забезпечення надійності входять: вибір матеріалів та елементів, оптимізація, резервування, забезпечення контролепридатності і ремонтпридатності конструкцій, вибір раціональних засобів і методів контролю й діагностування у виробництві та експлуатації, уточнення кількісних та якісних вимог щодо надійності на подальших стадіях створення АТ.

Головними задачами експериментального відпрацювання є: дослідження працездатності виробів і систем АТ в усьому діапазоні експлуатаційних впливів, перевірка запасів працездатності, перевірка ефективності заходів, спрямованих на забезпечення надійності АТ при її відпрацюванні.

Для детального обґрунтування програми експериментального відпрацювання використовують такі методи:

- метод структурно-функціонального аналізу або матричний метод, що дозволяє детально проаналізувати усі функції, виконувані кожним елементом на кожному рівні структури, у кожний період функціонування системи;

- методи побудови дерева непрацездатних станів і експериментальних способів вияву цих станів;

- метод теорії графів та мережні методи планування;

- методи теорії подібності;

- експертні методи.

Оптимізацію програми експериментального відпрацювання з урахуванням її детермінованої та стохастичної складової

здійснююють за допомогою методів динамічного програмування і статистичного моделювання.

Контрольні заводські випробування (попередні - для дослідного виробництва, прийнятно-здавальні, періодичні, типові, випробування на надійність - для серійного виробництва) проводять у процесі виготовлення продукції з метою контролю якості виробів і стабільності виробництва.

В цілому процес експериментального відпрацювання і випробувань можна охарактеризувати критеріями ефективності, які визначають ефективність витрат часу і коштів на експериментальне відпрацювання, точність і вірогідність отриманих результатів, інформативність випробувань.

В процесі дослідження ефективності і надійності АТ на стадії експлуатації вирішують такі завдання:

- оптимізацію експлуатаційних характеристик системи і програми експлуатації з урахуванням надійності;
- вибір оптимальних стратегій і режимів ТО виробів АТ та формування оптимальних (адаптивних) регламентів ТО ПС та АД;
- розробку рекомендації щодо забезпечення експлуатаційних властивостей об'єктів експлуатації з урахуванням регіональних особливостей експлуатації АТ;
- впровадження нових методів ТО АТ та керування технологічними процесами виробництва;
- діагностування та прогнозування технічного стану виробів АТ;
- забезпечення надійності АТ та збереження льотної придатності ПС та АД.

Головними джерелами економічної ефективності, що досягається внаслідок вирішення наведених задач, є такі:

- скорочення простоїв ПС на ТО за рахунок оптимізації обсягів і режимів ТОіР, підвищення якості виробів АТ, удосконалення організації ТО;
- удосконалення технологічних процесів ТО об'єктів експлуатації;
- використання оптимальних стратегій ТО;
- оптимізація обсягу і режиму контролю й діагностування об'єктів експлуатації.

Складовою частиною загального комплексу робіт щодо забезпечення надійності виробів АТ є аналіз результатів експлуатації АТ та оцінка показників надійності виробів. Головними задачами аналізу надійності виробів АТ в експлуатації є наступні:

- виконання та усунення відмов виробів АТ, зумовлених несумлінним прийняттям конструктивно-технологічних рішень;
- визначення експлуатаційних факторів, що значно впливають на працездатність виробів;
- оцінка показників надійності виробів АТ і оптимізація режимів та обсягів регламентних робіт;
- розробка заходів щодо підвищення і забезпечення надійності виробів АТ в експлуатації тощо.

В процесі експлуатації АТ виникають два взаємно протилежних процеси: процес зміни технічного стану об'єктів внаслідок зношення й фізико-хімічної зміни структури елементів при їхньому функціонуванні та процес відновлення технічного стану об'єктів при ТОіР (рис.1.2).



Рис.1.2. Процеси, які виникають під час експлуатації АТ

Інтенсивність зміни технічного стану об'єктів визначається його конструктивними особливостями, якістю виробництва, а також умовами та режимами експлуатації. Конструктивно-технічні фактори, які формують надійність АТ, визначаються:

- структурною побудовою систем АТ, що встановлює взаємозв'язок елементів та режими їхньої роботи;

- конструктивним виконанням окремих елементів та системи в цілому;

- ступенем відповідності конструктивних та схемних рішень реальним умовам функціонування АТ;

- ступенем придатності виробів АТ до ТО та відновлення працездатності у разі появи відмов.

Виробничо-технологічні фактори визначаються:

- реалізацією передових технологічних процесів;

- використанням сучасного обладнання;

- дотриманням вимог технічної документації;

- забезпеченням стабільності якості виробів АТ.

Експлуатаційно-технічні фактори визначаються за умов роботи та зовнішніх навантажень на систему, що знижують надійність АТ, у сукупності з ремонтно-профілактичними заходами, які включають в себе фактори активного керування процесом підтримки та забезпечення надійності системи під час її експлуатації.

Перспективним напрямом дослідження систем обслуговування є розробка адаптивних моделей експлуатації, моделей експлуатації з перебудовною структурою, які використовуються для удосконалення якості керування станом систем в міру накопичення інформації. Для розробки та застосування адаптивних моделей необхідно визначити технічні можливості й обчислювальну базу реалізації адаптивних моделей.

Ступінь відповідності прийнятих рішень заданим вимогам можна перевірити на основі моделювання процесу функціонування об'єкта експлуатації на ЕОМ при різних поєднаннях станів елементів систем ПС.

Високий технічний рівень виробництва потребує й відповідного рівня його організації. При цьому зростає роль експлуатаційної інформації про стан виробничих процесів, котра є основою для прийняття оперативних рішень, підвищує керованість виробничих процесів та забезпечує чіткість їх функціонування.

Ефективність керування досягається не тільки за рахунок використання прогресивних методів ТОіР, скорочення втрат

робочого часу, зменшення помилок ІТС, але й через підвищення рівня організаційної та технічної культури центрів ТОіР, удосконалення технології та організації виробництва.

Підтримка високого рівня надійності й безпеки польотів сучасних ПС, а також впровадження прогресивних методів ТОіР не можуть бути забезпечені без всебічного використання методів та засобів діагностування АТ. Об'єктивна та своєчасна оцінка технічного стану об'єктів експлуатації й прийняття обґрунтованого рішення про подальшу експлуатацію ПС або окремих його вузлів та систем можливі тільки за умов комплексного використання різних методів діагностування. Ці методи повинні ґрунтуватися на аналізі зміни основних параметрів, які характеризують роботу систем та вузлів, інтенсивності виробки ресурсу найбільш навантажених конструктивних елементів, результатів використання засобів неруйнуючого контролю.

Кінцевою метою керування є збереження придатності ПС до польотів та підвищення економічної ефективності застосування АТ на усіх стадіях життєвого циклу під наглядом уповноважених органів державного регулювання.

Проблема збереження придатності до польотів ПС є однією з найбільш актуальних при експлуатації авіаційної техніки. За сучасних умов роботи галузі це пов'язано з низкою важливих обставин: заснуванням великої кількості самостійних авіакомпаній та різнотипністю діючого парку ПС; змінами в авіаційній галузі принципів, правил і форм державного регулювання; експлуатацією парку ПС, що старіють, і т.ін.

Виконання широкого кола робіт по забезпеченню та збереженню придатності до польотів на різних етапах життєвого циклу ПС потребує створення єдиної системи програмного управління процесами забезпечення та збереження придатності до польотів, яка враховувала б міжнародний досвід та зберігала спадкоємність вітчизняної практики виготовлення та технічної експлуатації цивільної авіаційної техніки.

Таким чином, формування надійності виробів АТ є складним процесом, залежним від технічних та організаційних факторів, що охоплюють етапи проектування, виробництва та експлуатації.

Для забезпечення високої надійності АТ необхідно керувати процесом її формування, впливаючи на його окремі етапи та контролюючи ефективність керуючих впливів. При цьому важливе значення набувають питання розробки засобів об'єктивної оцінки рішень та створення економічного механізму керування надійністю АТ в експлуатації.

Запитання для самоперевірки

1. Обґрунтуйте значення проблеми забезпечення надійності АТ для ЦА.
2. Наведіть визначення і поняття надійності та її головних властивостей.
3. Вкажіть ознаки класифікації та типи відмов виробів АТ.
4. Вкажіть основні джерела інформації з надійності виробів АТ в процесі експлуатації.

2. ОСНОВИ ФІЗИЧНОЇ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

2.1. Фізична сутність відмов об'єктів АТ

Одна з важливих науково-технічних проблем, що вирішується з метою забезпечення надійності АТ, полягає у встановленні фізичної сутності виникнення відмов.

Відмова елементів - явище випадкове, але причина появи будь-якої відмови пов'язана з певними фізико-хімічними процесами, що обумовлюються дією таких взаємопов'язаних факторів (рис.2.1):

- структурною недосконалістю вихідних матеріалів виробів, обумовленою наявністю домішок, дислокацій, градієнтів концентрації тощо $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$;
- конструктивно-технологічними дефектами процесу виробництва $(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_k)$;
- зовнішніми навантаженнями G ;
- режимом використання Q .

Комплексний вплив перелічених факторів визначає проходження сукупності фізико-хімічних процесів у виробі:

$$X = F(V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m, t),$$

де $V_i = f(\gamma_i, d_j, Q, G, t)$ - швидкість протікання i -го фізико-хімічного процесу, що визначає наданий вид відмови виробу; t - час.

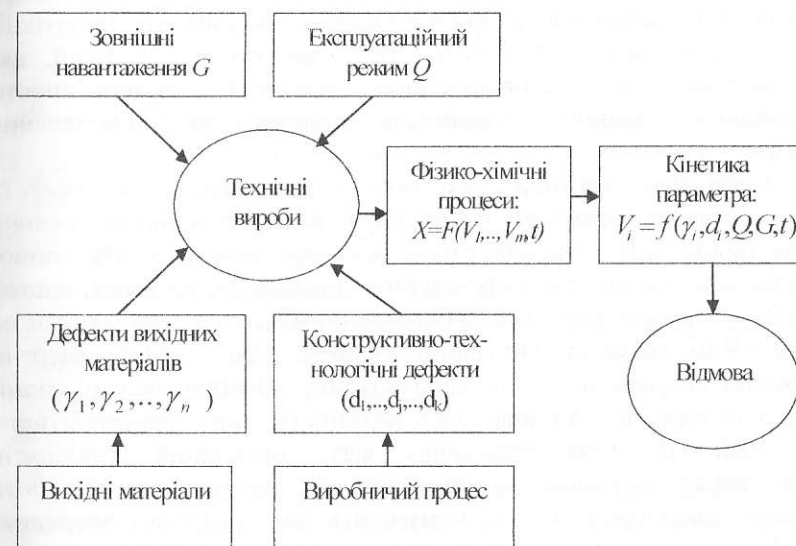


Рис.2.1. Фізична модель формування відмов технічних виробів

Конкретний вигляд моделей для окремих виробів визначається характером впливу різноманітних фізичних факторів на процес виникнення та розвитку відмов. До таких факторів відносяться зношування та старіння матеріалів, накопичення пошкоджень від втомлюваності, наявність виробничо-технологічних дефектів, місцевих концентраторів пошкоджень, неоднорідність матеріалів, тріщини, волосовіни та закови

матеріалу, невідповідність фактичних умов та навантажень розрахунково допустимим значенням.

Відмови виробів АТ мають різноманітні причини виникнення та різноманітні форми прояву. Найбільш характерними формами прояву відмов виробів АТ є відхилення вихідних параметрів функціональних систем та їхніх агрегатів від нормативних значень чи вихід параметрів за встановлені обмеження, механічні пошкодження, що призводять до появи тріщин, поломок, деформацій.

Залежно від характеру розвитку та форми вияву відмов виробів АТ розрізняють функціональну надійність (здатність виробу виконувати задані функції), параметричну (функції, що виконуються не задовольняють точності, економічності, ефективності), міцнісну надійність (поломки та пошкодження виробів).

Механізм відмови виробів визначається зміною їх властивостей та параметрів у часі, обумовлених зміною положення стану положення мікрочастинок в силу кінетики причинно-наслідкових зв'язків, що породжують відмови. Зміна властивостей матеріалів супроводжується перетворенням одного виду енергії на інший. Чим міцніші внутрішні зв'язки, тим більшу енергію необхідно витратити для їхнього розриву. Неврівноважені стани матеріалів виробів АТ внаслідок наявності у них різноманітного роду дефектів, неуврівноважених фаз, дислокацій, градієнтів концентрацій головних компонентів та домішок активізують процеси масопереносу та призводять до розриву всередині матеріалу і на межах розподілу фаз. Відмови супроводжуються різноманітними механізмами: концентрацією локальних напруг, накопиченням мікротріщин, механічним, корозійним або ерозійним зношенням, адгезією парів, пилю та порошоків, старінням.

Процес виникнення відмови є почасовий кінетичний процес, внутрішній механізм та швидкість якого визначаються структурою та властивостями матеріалу, напругами, температурою і т.ін. Внаслідок цього класифікація відмов виробів АТ за їхньою фізичною природою повинна бути передусім класифікацією фізико-хімічних процесів та механізмів відмов (табл.2.1).

Для ПС та АД вирішальне значення на працездатність елементів і виникнення відмов мають процеси, що відбуваються на

поверхні конструкцій, які підлягають безпосередньому впливу навколишнього середовища, вологості, забрудненню.

У місцях рухомих та нерухомих з'єднань деталей виникають різноманітні види механічного чи електроерозійного зношення, контактної корозії. Більшість фізико-хімічних процесів є термоактивними процесами, тобто інтенсивність протікання процесів збільшується при нагріванні елементів.

Таблиця 2.1

Класифікація фізико-хімічних процесів та характерні механізми відмов для виробів АТ

Процеси	Механізми відмов	Приклади
Термічні	Деформації, структурні зміни, фазові перетворення	Елементи турбіни авіаційних двигунів
Дифузійні	Корозія елементів, утворення тріщин, дислокації	Елементи планера, системи керування
Механічне навантаження	Механічне зношення, схоплювання, деформації, зруйнування елементів	Гальмові пристрої, силові елементи планера, шасі
Сорбційні	Ерозія, старіння, забруднення поверхні	Лопатки турбіни, проточна частина двигунів

Теплові процеси відіграють вирішальну роль у зміні властивостей та характеристик матеріалів авіаційних ГТД, процесах руйнування та старіння їхніх елементів.

Залежно від механізму виникнення відмов та пошкоджень виробів АТ їх можна класифікувати на такі групи:

- зруйнування від втомлювання, тріщини, деформації, викликані дією експлуатаційних навантажень;

- виробка рухомих з'єднань та заклепувальних швів, потертості та інші види механічного зношення елементів конструкції;

- зруйнування та деформації, викликані разовою дією навантаження, що перевищують розрахункові та пов'язані з особливими умовами польоту (сильна бовтанка, гроза, град і т.ін.),

або порушенням правил пілотування ПС (груба посадка, приземлення на підвищеній швидкості, невірне руління і т.ін.);

- втрата властивостей мастил та спеціальних рідин, що використовуються у вузлах, агрегатах та системах ПС;
- зруйнування лакофарбових та захисних покриттів;
- корозія елементів конструкції ПС;
- механічні пошкодження (деформації, пробоїни, подряпини і т.ін.), викликані недбалістю при ТО чи виконанні вантажно-розвантажувальних робіт.

Відмови та пошкодження перших двох груп пов'язані в основному з режимами експлуатації АТ (дальністю та висотою польоту, кількістю злетів та посадок, розмірами та висотою аеродромів і т.ін.). Пошкодження третьої групи пов'язані з якістю виконання польотів.

Дефекти наступних трьох груп відмов залежать головним чином від кліматичних умов експлуатації, режимів та якості ТО.

Остання група відмов та пошкоджень виробів АТ пов'язана з недоліками організації праці та кваліфікацією технічного складу.

Виникненню відмов всіх груп сприяють такі випадкові фактори конструктивно-виробничого характеру: недостатньо глибоке вивчення умов експлуатації елементів конструкції, невдалі конструктивні рішення, прийняті при розробці виробів, використання неякісних матеріалів, порушення режимів обробки деталей при виготовленні і т.ін.

2.2. Аналіз фізики відмов та пошкоджень повітряних суден та авіаційних двигунів

Обстеження причин відмов виробів АТ здійснюють експлуатаційні підприємства, при цьому досліджуються технічний стан виробів АТ, причини й обставини втрати виробами працездатності, механізми відмов; дається попередній висновок про фактори, що зумовили виникнення певного типу відмови і рекомендації щодо їхнього упередження. Результати обстеження причин відмови виробів відображають у первинному документі обліку інформації про відмови виробів АТ.

Аналіз надійності виробів АТ містить в собі:

- інженерний (якісний) аналіз причин відмов виробів АТ;

- інженерно-технічну обробку результатів спостережень;
- математичний (кількісний) аналіз надійності виробів;
- процедури, що пов'язані з узагальненням результатів кількісного і якісного аналізів надійності виробів АТ та розробкою керуючих впливів.

Метою якісного аналізу причин відмов виробів АТ є визначення фізичних явищ і процесів, які зумовлюють формування відмов виробів АТ, ступінь впливу відмов на працездатність функціональних систем АТ, вивчення ознак виникнення відмов, на основі чого розробляються та здійснюються заходи щодо підвищення надійності АТ.

Інженерно-технічна обробка результатів спостережень призначена для об'єднання статистичного матеріалу, забезпечення його однорідності та підготовки згрупованих результатів спостережень для математичного аналізу надійності АТ.

Інженерно-технічна обробка різномірної експлуатаційної інформації здійснюється у два етапи.

На першому етапі передбачається ретельний аналіз записів; уточнення та доповнення відомостей про причини відмови виробів АТ, наявних в іншій документації; об'єднання інформації про однотипові вироби АТ.

На другому етапі здійснюють класифікацію та об'єднання інформації про надійність виробів АТ за обраними ознаками з урахуванням наслідків відмов, режимів використання об'єктів експлуатації, впливу зовнішнього середовища, механізмів відмов тощо.

Логічний аналіз як кожної з ознак, так і їхньої сукупності (залежно від вирішуваної задачі) забезпечує комплексний характер та об'єктивність при визначенні причини відмов.

В процесі аналізу авіаційних систем часто класифікують відмови за їхньою функціональною значущістю залежно від того, до якої ситуації (катастрофічної, аварійної, складної, ускладнення польоту) призводить поява відмови.

За наслідками відмови поділяють на параметричні та відмови функціонування.

Параметрична відмова призводить до виходу параметрів (характеристик) виробу за допустимі межі. Такі відмови, як підтікання в елементах гідросистеми, підвищений рівень вібрації ГТД, подряпини на елементах конструкції планера, підвищена

витрата палива призводять до порушення працездатності об'єкта з точки зору вимог, встановлених нормативно-технічною документацією.

Відмови функціонування відбуваються внаслідок руйнування, поломок або заклинювання окремих елементів виробів. Для виробів АТ найбільш характерні параметричні відмови, пов'язані з високими вимогами до вихідних параметрів сучасних ПС.

У процесі інженерного аналізу причин та характеру проявів відмов виробів АТ важливо гармонічно пов'язувати аргументи, факти, явища, що зумовлюють появу кожної відмови, для чого передбачені структурні схеми, що дозволяють виділити істотні зв'язки та якісні їхні зміни, придатні для здійснення пошуку основних напрямків удосконалення виробів АТ. При цьому всі види відмов виробів АТ класифікують за сукупністю ознак на такі групи :

- сукупність ознак, що зумовлюють характер відмови виробів АТ (рис.2.2);
- сукупність ознак для визначення механізму відмов (рис.2.3);
- сукупність ознак, що характеризують експлуатаційні властивості виробів АТ (рис.2.4).

Перша група сукупності ознак характеризує відмову з точки зору її функціональної значущості, характеру прояву, причини появи, походження та служить основою розробки конструктивно-технологічних заходів щодо підвищення надійності виробів АТ.

Друга група сукупності ознак відмов виробів АТ відображає експлуатаційні властивості виробів та характеризує ефективність робіт з ТО, служить основою розробки експлуатаційних заходів щодо запобігання наслідків відмов.

Третя група сукупності ознак відмов виробів АТ є цінним додатковим джерелом інформації, що характеризує процес формування відмов та є мірою накопичення пошкоджень, що дозволяє встановити причинний зв'язок спостережуваних явищ, а також є основою для розробки конструктивно-технологічних рішень та прийняття експлуатаційних заходів щодо забезпечення надійності виробів АТ.

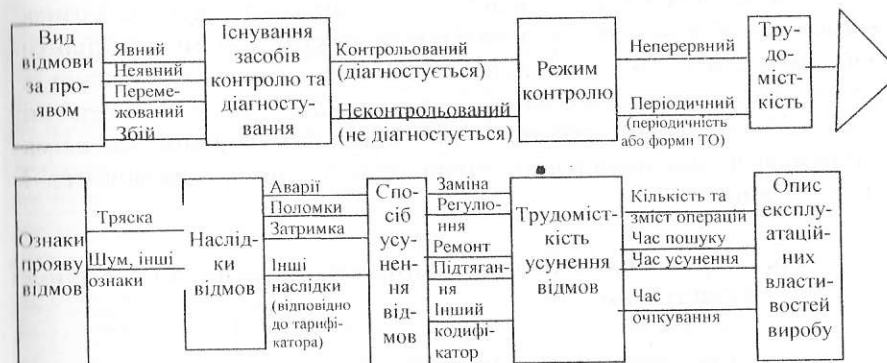


Рис. 2.2. Структурна схема класифікації відмови за сукупністю ознак, що обумовлюють характер відмови виробу АТ



Рис. 2.3. Структурна схема класифікації відмови за сукупністю експлуатаційних властивостей



Рис. 2.4. Структурна схема аналізу механізму відмови виробу АТ

На основі одержаних відомостей з усіх груп сукупності ознак відмов виробів АТ треба локалізувати джерело відмов, виділити найбільш слабкі ланки елементів, встановити причини та ознаки їх появи, зазначити механізми формування відмов та дати попередні рекомендації щодо забезпечення надійності виробів за всіма напрямками, що охоплюють етапи проектування, виробництва і експлуатації.

2.3. Збір інформації про надійність виробів АТ за умов експлуатації

Для отримання характеристик надійності виробів АТ, аналізу виникнення причин відмов та розробки заходів щодо підвищення надійності й безпеки польотів ПС необхідними є збирання та обробка статистичної інформації про відмови та пошкодження виробів АТ за умов експлуатації. Головними вимогами, які висуваються до інформації, є вірогідність, повнота та оперативність.

Збирання даних про надійність виробів і систем АТ організовано на всіх підприємствах ЦА. Система збирання інформації про надійність виробів АТ передбачає оперативне і періодичне надходження відомостей до організації, що збирає інформацію.

Ефективність методів збирання, обробки та аналізу експлуатаційної інформації визначається:

- отриманням повних і ефективних даних про надійність однотипових виробів АТ;
- можливістю узагальнення результатів обробки інформації про надійність;
- ефективністю зворотного зв'язку між розроблювачами, виготівниками та експлуатаційниками.

Для оцінки надійності виробів авіаційної техніки як джерела інформації можуть бути використані:

- картки урахування відмов та несправностей АТ (рис.2.5);
- донесення з авіаційних пригод та їхніх передумов;
- відомості про відмови та несправності, що були виявлені під час польоту та зареєстровані екіпажем в бортжурнал;
- картки-наряди на ТО та відомості дефектації;

Українія КАРТКА ОБЛІКУ НЕСПРАВНОСТІ АВІАТЕХНІКИ №

Дата	Борт № ПС	Тип ПС	Номер авіац.				Підприємство-власник ПС	!
/ /			1	2	3	4	Аеропорт посадки	
Виявлення несправності ПС		/ / / / / / / /						

Етап виявлення		На землі		В польоті		Наслідки	
11	Підготовка до вильоту	21	Зат	1	Затримка рейсу		год. хх
12	Буксирівка	22	Набравши висоти	2	Заміна ПС		
13	Запуск двигунів	23	Виплол	3	АП		
14	Рулювання	24	Зниження	4	ПАП (шпидетт)		
15	Оперативне ТО	25	Вихід на посадку	5	Без наслідків		
16	Періодичне ТО	26	Посадка		Привично затримка рейсу		
17	Інше ТО	27	Висівля	1	Пошук адреси несправності		
18	Діагностування		Підтвердження на землі	2	Аналіз несправності		
	Форма ТО		Підтверджася	3	Очікування запчастин		
			Не підтверджася	4	Очікування засобів ТО		
			Не провірявся	5	Відсутність виконавця		

Список відновлення справності ПС

<input type="checkbox"/>	Відновлено без змінних деталей	<input type="checkbox"/>	Відновлено із змінними деталями	<input type="checkbox"/>	Відновлено шляхом заміни деталей
--------------------------	--------------------------------	--------------------------	---------------------------------	--------------------------	----------------------------------

СИСТЕМА ПІДСИСТЕМА

Тип замовки (несправної) деталі	Заводський номер	Адреса на ПС	Підг.
(продовження на звороті)			

Виявлення несправності комплектуючої деталі

Причина несправності комплектуючої деталі 1 встановлена 2 передбачувана

Елемент РЕО

Прийняті міри у відношенні комплектуючої деталі	Блок	Суббл.	Узол.	Гр. ел.	Сх. №
---	------	--------	-------	---------	-------

<input type="checkbox"/> 1 Відновлено в ІАЦ	<input type="checkbox"/> 3 Направлено в ремонт	<input type="checkbox"/> 5 Відновлено представл. АП
<input type="checkbox"/> 2 Споласно	<input type="checkbox"/> 4 Направлено на дослідж.	<input type="checkbox"/> 6 Підлягає рекламації

Додаткові дані

Паспортні дані	Повітряне судно	2 - Двигун	3 - АСУ	Комплектуючі деталі
Тип (модифікація)				
Заводський номер				
Завод-виготовлювач	п/к	п/к	п/к	п/к
Дата вилітасу	(міс./рік)	(міс./рік)	(міс./рік)	(міс./рік)
НАПРАВЛЮВАННЯ	НПЕ	п	п	п
	ПІП	п	п	п
Кількість ремонтів				1-год. 2-год. 3-год.
Дата остав. рем.	(міс./рік)	(міс./рік)	(міс./рік)	(міс./рік)
Завод-остав. рем.				
Дата ост. уст. на ПС		(ч./мі./р.)	(ч./мі./р.)	(ч./мі./р.)

Рис. 2.5. Картка обліку несправності авіатехніки

- відомості про відмови та несправності АТ, що були виявлені ВТК (журнал обліку несправностей ВТК);

- спеціальні картки для збору та урахування інформації щодо технічного стану виробів АТ;

- звіти про результати випробувань виробів підприємствами-постачальниками, рекламацийні та технічні акти;

- звіти експлуатантів про результати аналізів регулярності польотів, якості ТО авіаційної техніки і т. ін.

Збір інформації організується за типами ПС. Інформація повинна містити такі основні групи відомостей про відмови та несправності виробів авіаційної техніки:

- адресні дані (бортовий номер та місце базування ПС, на якому відбулася відмова, його наробіток з початку експлуатації й після останнього ремонту, кількість ремонтів, заводський номер та наробіток виробу, що відмовив, дату відмови й встановлення виробу на літаку);

- опис зовнішнього прояву відмови або несправності (ознаки, за якими виявлені відмови або несправності виробів);

- характер відмови або несправності (фізична сутність зміни властивостей виробу);

- причини відмови або несправності;

- умови роботи виробу (значення параметрів, що характеризують режими роботи й навантажень виробу, зовнішній вплив);

- наслідки відмови (авіаційна пригода чи інцидент, затримка вильоту, відміна рейсу, порушення планових термінів завершення робіт з ТО);

- спосіб усунення відмови чи несправності (заміна, промивання, регулювання).

При дослідженні ремонтпридатності виробів АТ додатково необхідні дані щодо трудомісткості й методу усунення відмови чи несправності, обладнання й кваліфікації ІТС для проведення даної роботи, витрат.

Уніфікація словесних формулювань по кожній з перелічених груп відомостей дозволяє накопичувати, систематизувати й обробляти інформацію на ЕОМ.

Залежно від цілей аналізу надійності, що проводиться, змінюється необхідний обсяг по кожній з вказаних груп відомостей про відмови та несправності виробів АТ. Перед початком збирання

інформації важливо встановити необхідний обсяг відомостей та обрати форму збору даних, зручну для проведення якісного та кількісного аналізів надійності.

Експлуатаційні дані про відмови та несправності АТ мають різноманітну інформацію. У зв'язку з цим на початковому етапі дані, які вже є, належить піддати якісному інженерному аналізу з метою їх підготовки для проведення подальшої математичної обробки й оцінки показників надійності.

Різнорозмірний статистичний матеріал групують за класифікаційними ознаками, відкидають непотрібну інформацію (помилкові записи, описки, неповнота інформації про події і т.ін.), розмежовують відмови відновлювальних та невідно-влювальних виробів, що суттєво впливають на порядок математичної обробки інформації.

Залежно від задач, що вирішуються, можливі такі ознаки класифікації відмов (табл.2.2) за:

- ступенем впливу відмови на виконання системою основних функцій;

- характером чи причинами відмов;

- зовнішнім проявом відмов;

- видами відмов;

- наслідками відмов

- способом усунення відмов;

- фізико-хімічними процесами, що призводять до відмов, та швидкістю їх протікання і т. ін.

Інженерний логічний аналіз відмов проводять як за кожною з вказаних класифікаційних ознак, так й за їх сукупністю, чим забезпечується комплексний характер якісного етапу аналізу надійності.

Проведення якісного інженерного аналізу експлуатаційної інформації про відмови та пошкодження сприяє виявленню факторів, які впливають на надійність виробів АТ, розробці напрямків удосконалення її конструкції, вибору оптимальних режимів експлуатації, що забезпечує підготовку даних для їхньої математичної обробки.

Таблиця 2.2

Приклади аналізу відмов й пошкоджень об'єктів АТ

Ознаки відмови	Приклади
1. Критерій відмови	Якісна ознака (наявність): тріщини, забоїни, виплавлення термосвідку, зміна кольору термофарби, корозії, короблення
2. Факт відмови	Гранична довжина тріщини, глибина забоїни на лопатці компресора; граничний люфт у шарнірному з'єднанні шасі; руйнування підшипника
3. Зовнішній прояв відмови	Зміна показань приладів контролю, виникнення шумів (стуку) під час роботи об'єкта, поява кольору мінливості на корпусі підшипника, наявність стружки на фільтроелементі, наявність тріщини, забоїни
4. Вид відмови	Тріщина трубопроводу, зношування зубців шліцевого з'єднання; корозія деталі, забоїна лопатки компресора, руйнування манжетного ущільнювача, вигин рычага
5. Технічна сутність відмови	Масляне голодування; несоосність посадкових місць шліцевого валу; перекошення шестерень, відсутність приробу шестерень
6. Причина відмови	Явища: пластична деформація, розущільнення поверхні, радіаційне опромінення. Процеси: знос, виникнення й зростання тріщини, корозія, старіння. Події: поява перенавантажень, попадання абразиву в масло, захват зв'язаних поверхонь, порушення режимів експлуатації. Стани: відсутність захисту від пилу та вологи, наявність залишкових напруг, наявність концентраторів напруг, мікротріщини, дефекти збирання
7. Наслідки відмови	Явища: надпланові простой, матеріальні витрати, трудові витрати, фінансові витрати, зниження безпеки польотів, виникнення особливих ситуацій. Процеси: пошук несправностей, відновлення працездатності об'єкта (заміна, регулювання, ремонт), рекламація промисловості, доробка конструкції, розслідування авіаційних пригод, списання. Події: затримка вильоту, інцидент, вимушена посадка, виключення двигуна в польоті, авіаційна пригода. Стани: непрацездатний стан, поломка, руйнування конструкції, граничний стан

2.4. Застосування фізичних моделей надійності виробів авіаційної техніки

Постійне зростання вимог до рівня надійності виробів АТ, розвиток обчислювальної техніки і експериментальної бази призвели до широкого застосування моделювання при вирішенні задач проектування, виготовлення і експлуатації АТ.

Використання методів математичного та фізичного моделювання дозволяє вирішувати задачі розрахунку надійності, планування та випробувань, організації збирання й використання інформації про відмови та пошкодження виробів АТ; здійснювати розробку нових серій ПС і ефективно проводити доопрацювання (модернізацію) техніки, що експлуатується.

Питання попередження виникнення відмов мають принципове значення для забезпечення безпеки польотів. У зв'язку з цим все більша увага приділяється питанням прогнозування відмов та проведенню комплексних досліджень у сфері надійності та технічної діагностики.

Без глибокого вивчення фізичних явищ, що зумовлюють відмови, без ретельного обстеження кожної окремої ситуації неможливо накопичити необхідний матеріал для розробки правил ТО при підготовці АТ до використання.

Формалізація фізико-хімічних процесів дозволяє розробити моделі, на основі яких вивчається динаміка розвитку відмов, прогнозується зміна технічного стану об'єктів експлуатації, розробляються оптимальні системи контролю і методи технічного обслуговування (табл.2.3).

Встановлення залежностей між показниками надійності, з одного боку, і конструктивно-технологічними характеристиками, експлуатаційними навантаженнями, кінетикою фізико-хімічних процесів, що визначають окремий механізм відмови, - з другого, є основою забезпечення надійності виробів АТ.

Таблиця 2.3

Приклади фізико-хімічних моделей формування відмов виробів АТ

Механізм відмови	Моделі, що використовуються
1. Механічне зношення	$J = K \sqrt{\frac{h P_1}{R P_2 n}}$ $\frac{dJ}{dt} = \sigma_M \left[\frac{1}{\beta} + \frac{1}{KE} e^{-\frac{t}{K}} \right]$
2. Електрохімічна корозія	$m_t = \frac{i_0 S M t}{F} e^{\frac{\varphi}{B}}$
3. Старіння матеріалів (рівняння Журкова)	$\tau_0 = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma}{K_1 T} \right]$

Примітки: J – величина зношення; K – коефіцієнт (0,15...0,21); h, R – глибина та радіус викривлення мікрошорсткості; P – навантаження; P_2 – фактичний тиск на контакті; n – кількість циклів, які призводять до відшарування матеріалу; σ_M – діюче навантаження; β – в'язкість матеріалу; E – модуль пружності; t – наробка; m_t – кількість речовини, що відреагувала; i_0 – щільність корозійного току; S – площа поверхні; M – хімічний еквівалент речовини; F – число Фарадея; φ – перенапряга; B – незмінна Тафеля; τ_0 – період теплових коливань атомів; K_1 – незмінна Больцмана; U_0 – початковий активаційний бар'єр; γ – структурно-чутливий коефіцієнт; T – абсолютна температура.

Розглядаючи фізичні явища і процеси, які зумовлюють виникнення відмов елементів та пристроїв, слід визначити: оптимальну ступінь деталізації фізико-хімічного аналізу, число параметрів, що враховуються при побудові фізико-математичних моделей відмов, можливість введення різних обмежень.

Опис механізмів відмов конструкцій ПС дозволяє виявити сховані відмови в елементах, проводити прискорені випробування, розрахувати зміни визначальних параметрів у різних ситуаціях.

Дослідження механізмів відмов виробів АТ включає в себе:

- аналіз варіантів перетворення енергії елементів, фізики функціонування;

- визначення призначення матеріалів, що входять до конструкції; визначення їхніх фізико-хімічних властивостей;

- вивчення причин виникнення дефектів, ступінь впливу різноманітних навантажень;

- аналіз сумісності матеріалів у конструкції, взаємної фізико-хімічної активності;

- локалізацію місць, що мають мінімальний запас міцності;

- вибір помітних за кінетикою фізико-хімічних процесів розвитку відмов;

- побудову фізико-статистичних моделей надійності.

Ступінь впливу експлуатаційних факторів оцінюють відносно базових значень. Тоді для показника надійності інтенсивності відмов можна записати модель у загальному вигляді

$$\lambda(t) = \lambda_0 \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n = \lambda_0 \prod_{i=1}^n \alpha_i(t),$$

де λ_0 – базове значення інтенсивності відмов елемента конструкції;

n – кількість факторів впливу;

$\lambda_i(t)$ – коефіцієнт впливу i -го параметра.

Побудова моделей коефіцієнтів $\lambda_i(t)$ базується на теоретичних та експериментальних дослідженнях впливу температури, вологи, механічних та інших впливів з урахуванням того, що сумарні енергетичні навантаження на елементи мають різні величини в процесі роботи за реальних умов відносно базових:

$$\prod_{i=1}^n \alpha_i(t) = f \left\{ \frac{W_\Sigma}{W_H} \right\} = f \left\{ \frac{1}{W_H} (W_Q + W_Z + W_M + \dots) \right\},$$

де W_Σ – сумарне енергетичне навантаження за реальних умов експлуатації;

W_H – енергетичне навантаження нормальних умов роботи;

W_Q, W_Z, W_M – навантаження тепла, вологи й механічних впливів відповідно.

Чим більше значення коефіцієнта $\alpha_i(t)$, тим в жорсткіших умовах експлуатації знаходиться елемент й нижча його надійність.

При моделюванні за загальними механізмами відмов рівняння має вигляд

$$\lambda(t) = \sum_{M=1}^F \lambda_M(t) \prod_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

де F та M – число та номер механізму відмови.

Побудова конкретних моделей залежить від кількості рівнів ієрархічної структури матеріальної конструкції та наявності теоретичних й експериментальних можливостей детального аналізу фізики надійності.

Однак застосування способів оцінки надійності виключно фізичними методами є обмеженим, оскільки показники надійності, отримані на підставі фізичних моделей, не враховують випадкову природу відмов і характеризують максимальне значення без урахування реальних режимів застосування та експлуатації АТ.

Поєднання статистичних та імовірнісних методів з фізико-хімічними моделями процесів, що відбуваються у виробках під час їхнього функціонування, є найбільш ефективним напрямом досліджень надійності АТ.

Запитання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте процеси, що відбуваються в конкретних виробках АТ під час виконання робочих функцій.
2. Визначте причини відмов та пошкоджень виробів у процесі експлуатації.
3. Назвіть головні фактори, які визначають зміни технічного стану об'єктів експлуатації.
4. Наведіть схему фізичної моделі формування відмов виробів АТ.

3. ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

3.1. Характеристики надійності

В процесі проектування, виготовлення, випробувань та експлуатації АТ для вирішення різноманітних інженерних завдань потрібні кількісні характеристики надійності. Час роботи виробів до відмови залежить від багатьох причин, що дозволяє розглядати кількість відмов та час їхнього виникнення як випадкові величини. Саме випадковість виникнення подій є характерною особливістю проблем, що постають при вивченні надійності об'єктів експлуатації.

Тому для вивчення закономірностей появи таких подій у теорії надійності застосовані теорія імовірностей і математична статистика.

Відмову виробу трактують як випадкову подію, а термін роботи до виникнення відмови τ – як випадкову величину. Таким чином, відмова є подією, при якій випадкова величина τ менша, ніж заданий термін роботи виробу t . При $\tau > t$ відмова виробу на протязі часу t не виникатиме.

Як головну кількісну міру надійності об'єктів, що характеризує закономірності виникнення відмов у часі, приймають імовірність безвідмовної роботи $R(t)$:

$$R(t) = \text{імов}(\tau > t).$$

Імовірність відмови визначають як імовірність того, що час безвідмовної роботи τ менший за заданий час t :

$$Q(t) = \text{імов}(\tau < t).$$

Оскільки при будь-якому значенні наробітку t виріб може бути або працездатним, або таким, що втратив працездатність, то

$$R(t) + Q(t) = 1.$$

Статистичне визначення цих характеристик

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}; \quad \hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0},$$

де $N(t)$ – кількість справних об'єктів в момент часу t ;

N_0 – кількість справних об'єктів в початковий момент часу;

$n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили, за час t .

Для характеристики швидкості зміни надійності об'єктів експлуатації використовують щільність розподілу часу безвідмовної роботи:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}.$$

Статистичне визначення

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

де $\Delta n(t, \Delta t)$ – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$;

N_0 – кількість справних об'єктів в початковий момент часу;

Δt – тривалість інтервалу часу.

Якщо випадкова величина τ має щільність розподілу $f(t)$, то

$$R(t_1) = 1 - Q(t_1) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} f(t) dt.$$

Приблизний вигляд функцій $R(t)$, $Q(t)$ і $f(t)$ та їхній взаємозв'язок зображено на рис.3.1. Особливістю кривої $f(t)$ є те, що площа під кривою дорівнює одиниці.

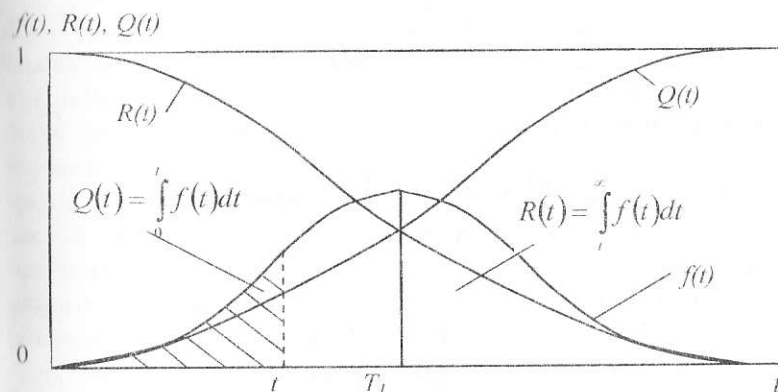


Рис. 3.1. Приблизний вигляд функцій $f(t)$, $R(t)$, $Q(t)$ та їхній взаємозв'язок

На практиці слід визначити імовірність безвідмовної роботи систем ПС та АД протягом польоту за умови їхньої справності та готовності до виконання польотного завдання, тобто визначити імовірність безвідмовної роботи системи на проміжку часу, якщо до початку проміжку, що розглядається, система не відмовила.

Імовірність безвідмовної роботи системи можна знайти як імовірність одночасного настання двох подій: безвідмовної роботи системи у період часу від θ до t та безвідмовної роботи у проміжку часу (t_1, t_2) :

$$R(t_2) = R(t_1) R\left(\frac{t_1, t_2}{t_1}\right),$$

а умовна імовірність відмови системи за період часу від t_1 до t_2

$$Q\left(\frac{t_1, t_2}{t_1}\right) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{R(t_1)}.$$

Умовна імовірність відмови на елементарному проміжку часу

$$Q\left(\frac{t, t + \Delta t}{t}\right) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

Застосовуючи похідну

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

отримаємо

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)},$$

де $\lambda(t)$ - умовна щільність імовірності відмови у момент часу t за умови, що до цього моменту система працювала безвідмовно.

Цю характеристику надійності називають інтенсивністю відмов.

Статистичне визначення

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(t)\Delta t},$$

де $n(t)$ - кількість об'єктів, що відмовили, за час t ;

$\Delta n(t, \Delta t)$ - кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$;

$N(t)$ - кількість справних об'єктів в момент часу t ;

Δt - тривалість інтервалу часу.

На практиці виявлення закономірностей змінювання надійності розпочинають з побудови λ -характеристик. Типова λ -характеристика зображена на рис.3.2.

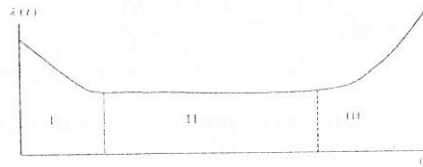


Рис.3.2. Типова λ -характеристика

В початковий період наробітку виробу відбувається приріб його складових частин, виявляються виробничі дефекти, трапляються відмови внаслідок недостатньо високої якості вихідних матеріалів, що зумовлює підвищений рівень інтенсивності відмов на I ділянці λ -характеристики. В період нормальної експлуатації виробів (II ділянка) інтенсивність відмов практично не залежить від часу наробітку виробів. Відмови у цей період мають головним чином раптовий характер. Зростання інтенсивності відмов на III ділянці λ -характеристики пов'язано із старінням матеріалів конструкцій, зношуванням виробів, накопичуванням незворотних пошкоджень.

Імовірність безвідмовної роботи системи на проміжку часу (t_1, t_2) через інтенсивність відмов визначають за виразом

$$R\left(\frac{t_1, t_2}{t_1}\right) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}$$

При $t_1 = 0$ і $R(t) = 1,0$ формула набуває вигляду

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right].$$

Це загальна формула, що характеризує надійність об'єктів експлуатації.

Знання однієї з будь-якої функції $R(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ і $\lambda(t)$ дозволяє визначити інші (табл.3.1).

Різниця між інтенсивністю відмови $\lambda(t)$ та щільністю розподілення $f(t)$ в тому, що елемент імовірності $f(t)dt$ характеризує імовірність відмови об'єкта на елементарному відрізку часу dt . При цьому невідомо, чи справний об'єкт до початку цього відрізка, чи він відмовив у попередній період роботи.

Таблиця 3.1

Взаємозв'язок між характеристиками надійності

Відома функція	Формули для визначення інших функцій			
	$R(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	-	$1 - R(t)$	$-\frac{d}{dt} R(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t)$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	-	$\frac{d}{dt} Q(t)$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{d}{dt} Q(t)$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(x) dx$	$\int_0^t f(x) dx$	-	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x) dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	-

Елемент умовної імовірності $\lambda(t)dt$ характеризує імовірність відмови об'єкта на елементарному відрізку часу dt , якщо відомо, що до початку цього відрізка він не відмовив. Зв'язок між інтенсивністю $\lambda(t)$ та щільністю $f(t)$ при малих значеннях $\lambda(t)$ та щільністю розподілу t незначний: $f(t) \approx \lambda(t)$. При $t = 0$ імовірність $R(0) = 1$ та $f(0) = \lambda(0)$. Однак $\lambda(t) \neq f(t)$ для усіх $R(t) < 1$.

На додаток до функцій $R(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ і $\lambda(t)$ часто використовують для неремонтованих об'єктів середній наробіток до відмови T_1 :

$$T_1 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

Останній інтеграл відповідає площині під графіком функції надійності $R(t)$.

Середній час безвідмовної роботи характеризує наробіток об'єкта до моменту виникнення відмови. При цьому з множини однотипних об'єктів, що знаходяться в експлуатації, частина об'єктів працюватиме безвідмовно час, більший за T_1 , а частина –

відмовить, не допрацьовуючи до T_1 . Наглядність того, наскільки велике відхилення часу безвідмовної роботи об'єкта від середнього значення, дає дисперсія часу безвідмовної роботи. Дисперсія характеризує величину розсіювання часу безвідмовної роботи відносно математичного очікування.

Дисперсія часу безвідмовної роботи об'єкта визначається за формулою

$$D = \int_0^{\infty} (t - T_1)^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - T_1^2 = 2 \int_0^{\infty} t R(t) dt - T_1^2.$$

Для наглядної характеристики розсіювання зручніше використовувати величину, вимірювання якої збігається з вимірюванням випадкової величини \hat{t} . Такою величиною є середньоквадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{D}.$$

Розглянуті критерії характеризують надійність невідновлювальних об'єктів, що працюють до першої відмови. Невідновлювальні об'єкти після виникнення відмови до подальшої експлуатації не допускаються.

3.2. Характеристика надійності відновлювальних об'єктів

Відновлення об'єктів, що відмовили, проводиться обслуговуючим персоналом. Характеристики процесу відновлення враховують як суб'єктивний, так й об'єктивний характер діяльності людини.

Розглядаючи характеристики надійності відновлювальних об'єктів іноді ще змішують характеристики процесу відновлення (що містять в собі характеристики діяльності людини) й характеристики надійності самих об'єктів. Тому слід нагадати, що "під надійністю розуміється властивість об'єкта виконувати задані

функції", в даному випадку за умови їх многократного відновлення.

Після кожної відмови об'єкт відновлюється або шляхом заміни несправного елемента, або шляхом його ремонту. Вважаємо, що відновлення повністю повертає об'єкту ті властивості, котрими він володів до відмови, так що його неможливо відрізнити від нового об'єкта. Зрозуміло, що при такому припущенні тривалість роботи об'єкта з моменту його відновлення до чергової відмови не залежить від того, скільки разів він відмовив у минулому.

Процес експлуатації об'єкта з відновлюванням можна представити як послідовність інтервалів працездатності t_i , які чередуються з інтервалами простою ξ_i : $t_1, \xi_1; t_2, \xi_2; \dots; t_n, \xi_n$. Як математична модель процесу експлуатації об'єкта може виступати відповідний випадковий процес (рис.3.3).

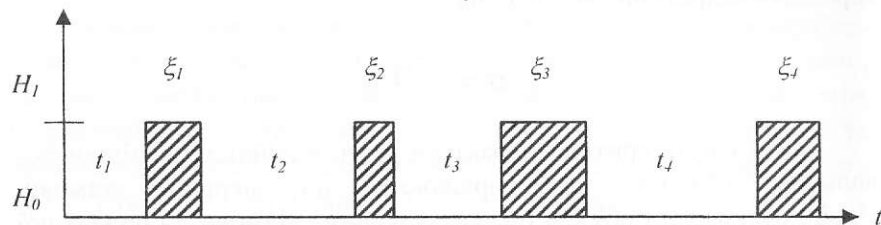


Рис.3.3. Випадковий процес експлуатації об'єкта, що містить в собі чергування працездатності й простою

Послідовність подій при виникненні відмов у випадковий момент часу $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3, \dots, \hat{t}_n$ утворює потік подій або потік відмов. Найпростішим потоком відмов називається потік, який одночасно має властивості стаціонарності, ординарності та відсутності післядії. Потік називається *стаціонарним*, якщо імовірність появи тієї чи іншої кількості відмов на відрізку часу від t_1 до t_2 залежить тільки від довжини відрізка й не залежить від того, де саме на осі часу він знаходиться. Потік називається *ординарним*, якщо імовірність появи двох чи більш відмов на елементарному відрізку часу Δt несуттєва порівняно з імовірністю появи однієї відмови.

Потік називається *потокотом відсутності післядії*, якщо імовірність появи визначеної кількості відмов на деякому відрізку часу не залежить від кількості та характеру відмов, що виникли на цьому відрізку.

Показником надійності відновлювальних об'єктів приймається імовірність того, що випадкова кількість відмов $v(t)$ за розглянутий проміжок часу t буде менше заданого або допустимого числа k :

$$\text{імов}[v(t) < k] = R_k(t).$$

Відповідно імовірність того, що за час t відбудеться k або більша кількість відмов $\{v(t) \geq k\}$, можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \text{імов}\{v(t) \geq k\} &= \text{імов}\left[\hat{t}_k < t\right] = \\ &= \text{імов}\left[\hat{t}_1 + \hat{t}_2 + \dots + \hat{t}_i + \dots + \hat{t}_k \leq t\right] = q_k(t). \end{aligned}$$

Звідси

$$\begin{aligned} q(k, t) &= \text{імов}[v(t) \geq k] - \text{імов}[v(t) \geq k+1] = \\ &= \text{імов}[v(t) = k] = q_k(t) - q_{k+1}(t), \quad \text{де } k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

де $q(k, t)$ – імовірність появи за час t рівно k відмов.

Імовірність появи за час t рівно k відмов може бути показником надійності відновлювальних об'єктів. Більш універсальною характеристикою надійності відновлювальних об'єктів є середня кількість відмов, що відбуваються до моменту t , її називається *функцією відновлювання* $H(t)$. Знаючи функцію $q_k(t)$, можна знайти $H(t)$ як математичне очікування кількості відмов $v(t)$, що відбулися за момент t :

$$H(t) = \sum_{k=1}^{\infty} kq(k, t) = \sum_{k=1}^{\infty} k[q(t) - q_{k+1}(t)] =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} kq_k(t) - \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)q_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t),$$

тобто

$$H(t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t).$$

Якщо функція відновлювання $H(t)$ відома, то середня кількість відмов на будь-якому відрізку часу від t_1 до t_2 буде дорівнювати

$$H(t_1, t_2) = H(t_2) - H(t_1).$$

Якщо визначити щільність відновлення у вигляді

$$z(t) = \frac{dH(t)}{dt},$$

то середня кількість відмов на відрізку часу від t_1 до t_2 буде

$$H(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} z(t) dt.$$

Функцію $z(t)$ називають параметром потоку відмов і її можна представити у вигляді

$$z(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t),$$

де

$$f_k(t) = \frac{dq_k(t)}{dt}.$$

Підсумовуючи n довільних потоків подій, функції $H_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) та $z_i(t)$ отримаємо

$$H_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n H_i(t); \quad z_{\Sigma}(t) = H'_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t).$$

Отримання аналітичних виразів функцій $H(t)$ та $z(t)$ пов'язано з розрахуванням k -кратного згортання функції $q(t)$, тобто знаходженням $q_k(t)$ або $f_k(t)$.

Щільність відновлювання $z(t)$ та функцію відновлювання $H(t)$ можна виразити через відповідні характеристики $f(t)$ й $q(t)$ невідновлювальних або працюючих до першої відмови об'єктів за допомогою рівняння відновлювання, котрі для $z(t)$ і $H(t)$ записуються відповідно у вигляді

$$z(t) = f(t) + \int_0^t f(t-x)z(x) dx$$

та

$$H(t) = q(t) + \int_0^t H(x)f(t-x) dx.$$

В загальному випадку ці рівняння інтегруються чисельно. При цьому, зазвичай, використовують метод послідовних наближень.

Слід відзначити ще одну важливу для практики властивість функції $z(t)$ – в багатьох випадках

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = \frac{1}{T_0},$$

де T_0 – середній наробіток на відмову.

Ця властивість відображає той факт, що з часом процес відмов та відновлювань стає стаціонарним, і середня кількість відмов, що виникають на одиницю часу, не залежить від тривалості попередньої експлуатації.

Слід відзначити, що $z = \lambda$ тільки у випадку найпростішого потоку відмов. У загальному випадку ці величини різні: $z(t)$

приблизно дорівнює безумовній імовірності відмови за одиницю часу, а $\lambda(t)$ є умовною щільністю розподілення часу безвідмовної роботи. Інакше кажучи, $z(t)$ – середня кількість відмов відновлювального об'єкта, що припадає на одиницю часу.

Розглянуті характеристики надійності відновлювальних об'єктів являються вихідними при вивченні питань збереження льотної придатності ПС та АД та організації технічного обслуговування в процесі експлуатації АТ.

3.3. Математичні моделі надійності

Функція розподілу часу безвідмовної роботи є повною характеристикою надійності об'єктів експлуатації. Визначення функції $R(t)$ на практиці потребує великого обсягу випробувань, значних витрат часу і праці.

При відомому вигляді функції надійності

$$R(t) = R(t, \alpha, \beta, \dots)$$

для визначення параметрів α, β функції розподілу потрібен значно менший обсяг випробувань.

Побудова моделі надійності передбачає визначення аналітичного виразу для імовірності безвідмовної роботи об'єкта. Така модель надійності системи встановлює залежність імовірності безвідмовної роботи системи від показників надійності елементів з урахуванням структури (виду структурної схеми надійності) системи. У свою чергу, модель надійності елементів, наприклад, зношуваних механічних об'єктів встановлює залежність безвідмовної роботи елемента від параметрів процесу зношування, механічних елементів, які руйнуються під дією статичних чи циклічних навантажень, від напруження та міцності тощо.

Встановлення аналітичного виразу функції розподілу випадкових величин (наробітку, ресурсу тощо) дозволяє визначити необхідні показники надійності (середні та гама-відсоткові показники, імовірність безвідмовної роботи тощо). У цьому випадку вибір цієї чи іншої теоретичної моделі відмов обумовлює

певну точність одержуваних кількісних показників надійності. Методичні похибки оцінок показників надійності, певних моделей можуть мати суттєве значення.

Вибір моделі відмов, тобто визначення аналітичного виразу функції розподілу, проводять на підставі аналізу:

- статистичних даних наробітків до відмови (ресурсу чи збережуваності);
- фізичних процесів деградації, які зумовлюють відмову (граничний стан).

Перший підхід встановлення закономірностей появи відмов полягає у використанні деяких розподілів випадкових величин, які відомі в теорії імовірностей як моделі відмов. Тоді відмови розглядають як абстрактні випадкові події, а моделі відмов називають імовірнісними (статистичними).

Другий підхід для встановлення закономірностей появи відмов здійснюється на підставі аналізу статистичних закономірностей протікання фізичних процесів, які призводять до відмов. Цей підхід визначає моделі відмов, які спеціально побудовані для опису явища, що вивчається. У цьому випадку параметри розподілу мають конкретну фізичну інтерпретацію, а моделі відмов називають імовірнісно-фізичними.

У ряді випадків мають місце досить значні залежності між механізмами відмов і видами функцій розподілу, які дозволяють зробити їх обґрунтований вибір. При цьому важливо апроксимувати характеристики надійності відомими теоретичними функціями розподілу.

В табл.3.2 наведені головні закони розподілу часу безвідмовної роботи, що застосовуються як моделі надійності виробів АТ, та їхні характеристики.

Таблиця 3.2

Закони розподілу та їхні характеристики

Закон розподілу	Характеристики			Застосування розподілу
	P(t)	f(t)	$\lambda(t)$	
Експоненційний: $P(t) = e^{-\lambda t}$, $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $\lambda(t) = const$				При аналізі складних систем, які пройшли період приробу, раптових відмовах, що виникли внаслідок дефектів технології, в теорії масового обслуговування Цьому закону підпорядкований наробіток між послідовними відмовами в режимі, який усталився
Нормальний: $P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$, $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$, $\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \frac{f_0(t-m)}{\Phi(\frac{t-m}{\sigma})}$				При відмовах внаслідок зношення та старіння елементів При відмовах внаслідок впливу великої кількості факторів, різнозначних за величиною

Закінчення табл. 3.2

Закон розподілу	Характеристики			Застосування розподілу
	P(t)	f(t)	$\lambda(t)$	
Вейбулла: $P(t) = e^{-\frac{t^\beta}{a}}$, $f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\frac{t^\beta}{a}}$, $\lambda(t) = \frac{b}{a} t^{b-1}$				При описі термінів служби підшипників, електронних ламп, характеристик міцності, стійкості від втомленості, а також характеристик довговічності механічних систем.
Гама-розподіл: $P(t) = \int_0^t \frac{a^b}{\Gamma(b)} t^{b-1} e^{-at} dt$, $f(t) = \frac{a^b}{\Gamma(b)} e^{-at} t^{b-1}$, $\lambda(t) = \frac{t^{b-1} e^{-at}}{\int_0^t t^{b-1} e^{-at} dt}$				При описі наробітку до відмови внаслідок зношення чи накопичення пошкоджень, наробітку системи з резервними елементами, часу відновлення (Г(β)-гама функція).

Вибір моделей надійності здійснюють на основі аналізу фізики процесів, що призводять до відмов, досвіду експлуатації, законів розподілу наробітку виробів до відмови аналогічних виробів.

Як додаткову інформацію використовують відомості про характер зміни $R_i(t)$, $f_i(t)$ і $\lambda_i(t)$, які визначають за формулами:

$$f_i(t) = \frac{\Delta n_i}{N_0 \Delta t}; \quad \lambda_i(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}; \quad R(t) = \frac{N(t)}{N_0},$$

де Δn_i - кількість відмов у i -у інтервалі;

N_0 - загальна кількість виробів;

Δt - інтервал наробітку;

$N(t)$ - кількість працездатних виробів до моменту часу t .

На підставі результатів розрахунку інтервальних значень даних показників будують гістограми та визначають характер їхніх змін за наробітком.

Урахування фізичної природи відмов та причин їхнього виникнення під час формалізування моделей відмов визначає фізичне обґрунтування моделей відмов і дозволяє ефективніше вирішувати практичні завдання надійності.

Прийняття гіпотези про вид функції розподілу часу безвідмовної роботи є відповідальним етапом при обробці та аналізі результатів експлуатаційних спостережень. Експериментально встановлена задовільна відповідність процесів, які призводять до раптових відмов, експоненційному закону розподілу, процесів зношення – нормальному закону. Процеси руйнування від втомленості чи сукупності видів руйнування елементів об'єкта експлуатації можуть бути описані розподілом Вейбулла.

Для об'єктивної оцінки вірності вибору математичної моделі використовують критерії згоди.

Процедура перевірки узгодження теоретичного й емпіричного розподілів полягає в обчисленні критерія, який характеризує ступінь розходження між цими розподілами, та

порівнянні його значення із критичною областю, на підставі чого приймають чи відкидають гіпотезу (модель), що перевіряється.

Важливою принциповою особливістю застосування критеріїв є те, що в результаті перевірки узгодження неможливо довести жодної гіпотези. Прийняття гіпотези свідчить лише про те, що обрана модель не суперечить дослідним даним.

Із великої групи критеріїв найчастіше застосовують критерій Колмогорова, критерій χ^2 , критерій Романовського.

При використанні критерію Колмогорова за міру розходження приймають число D :

$$D = D_{\max} \sqrt{n},$$

де D_{\max} - максимальне абсолютне значення різниці емпіричної та теоретичної функцій розподілів;

n - кількість інтервалів.

На підставі порівняння міри розходження D з квантилем розподілу Колмогорова D_α за рівнем значущості α приймають $(D < D_\alpha)$ або відкидають $(D > D_\alpha)$ висунуту гіпотезу.

При використанні критерія χ^2 за міру розходження приймають число H , яке визначають за формулою:

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - NR_i)^2}{NR_i},$$

де m_i - кількість відмов у i -у інтервалі наробітку;

N - обсяг вибірки;

R_i - теоретична імовірність відмови в i -у інтервалі.

На підставі порівняння значення H із квантилем χ^2 -розподілу за рівнем значення α з l ступенями свободи $(\chi^2_{\alpha,l})$ дають висновок про вибір гіпотези. При цьому, якщо $H < \chi^2_{\alpha,l}$, гіпотезу

приймають, якщо $H \chi^2_{\alpha, l}$, то гіпотезу відкидають, і всю послідовність обробки результатів експлуатації повторюють на основі іншої гіпотези про вид функції розподілу.

Романовський запропонував метод оцінки наближення емпіричного та нормального розподілів, використовуючи відношення

$$\frac{\chi^2 - K}{\sqrt{K}} < 3,$$

де K - кількість ступенів свободи;

Розходження вважають несуттєвим при виконанні цієї нерівності.

Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель відмов), і вся проблема оцінки показників надійності об'єкта зводиться до оцінки параметрів цього розподілу.

3.4. Показники надійності

Функція розподілу часу безвідмовної роботи є вичерпною характеристикою надійності об'єкта експлуатації. Отже, на практиці зручніше оцінювати надійність об'єктів показниками, що характеризують властивості виробів за певний проміжок часу, у встановлених режимах ТОіР, за заданих умов виконання відновлювальних робіт і т.ін. Якщо відома функція розподілу, то для такого об'єкта можна визначити будь-який показник надійності.

Показниками надійності можна оцінити властивості об'єктів на протязі заданого часу їхньої експлуатації і при невідомій функції розподілу наробітку до відмови, що особливо важливо для виробів АТ, експлуатація яких відбувається в межах встановлених ресурсів.

Крім того, оцінка показників надійності потребує значно меншого обсягу випробувань (експлуатаційних спостережень), ніж оцінка функції розподілу.

Для оцінки надійності застосовують одиничні та комплексні показники (табл.3.3). Одиничний показник характеризує одну з властивостей надійності, в той час як комплексний - кілька властивостей.

Показники надійності виробів АТ обирають із номенклатури показників, встановлених стандартами, з урахуванням призначення виробів і функцій, які виконуються ними, умов роботи та особливостей функціонування виробів, означених цілей і вирішуваних завдань. Так, показниками безвідмовності невідновлюваних об'єктів є імовірність безвідмовної роботи $R(t)$, середній наробіток до відмови T_1 , інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

Параметр потоку відмов $z(t)$ і середній наробіток на відмову T_0 використовують для оцінки безвідмовності відновлюваних об'єктів. Імовірність безвідмовної роботи для відновлюваних об'єктів можна обчислити за умови, що оцінку однорідних об'єктів здійснюють до першої відмови, виключаючи їх із сукупності, що розглядається. Для об'єктів, що знаходяться у черговому режимі та призначених для виконання миттєвих операцій (протипожежне обладнання), показником надійності обирають коефіцієнт готовності $A(t)$. Якщо при цьому об'єкт призначено для тривалого використання, то застосовують коефіцієнт оперативної готовності $A_{op}(t)$.

При виборі показників надійності керуються наступним:

- вказують ресурси або календарні терміни для виробів, що ремонтуються, до зняття і до списання; для виробів, що не ремонтуються, - тільки до зняття;

- обирають інтенсивність відмов λ для виробів, для яких λ у певний період експлуатації можна прийняти як постійну, для інших об'єктів вибирають T_1 чи надають функцію $\lambda(t)$ у вигляді графіка чи аналітичного виразу;

- вибирають імовірність безвідмовної роботи за цикл для виробів, що знімаються з експлуатації або підлягають ремонту в кожному циклі;

Таблиця 3.3

Головні показники надійності

Властивість надійності	Показник надійності	Формули визначення показників надійності	
		параметричний випадок	непараметричний випадок
Одиничні показники			
Безвідмовність	Імовірність безвідмовної роботи $R(t)$	$\int_0^{\infty} f(t) dt$	$\frac{N - r(t)}{N}$
	Середній наробіток до відмови T_1 (MTTF)	$\int_0^{\infty} t f(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ [NVT]
	Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	$\frac{f(t)}{R(t)}$	$\frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}$
	Середній наробіток на відмову T_0 (MTBF)	-	$\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^N Q_i$
	Параметр потоку відмов $z(t)$	$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_r(t, t + \Delta t)}{\Delta t}$	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N r_i(t)}{N\Delta t}$
Довговічність	Гама-відсотковий ресурс $t_{R\gamma}$	$1 - \int_0^{t_{R\gamma}} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}$	$\frac{r(t_i) + 1}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$

Продовження табл.3.3

Властивість надійності	Показник надійності	Формули визначення показників надійності	
		параметричний випадок	непараметричний випадок
	Середній ресурс \bar{t}_R (середній термін служби)	$\int_0^{\infty} t f(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$
Ремонтпридатність	Імовірність відновлення $M(t)$	$\int_0^{t_B} f_B(t) dt$	$\frac{r(t_B)}{N}$
	Середня тривалість відновлення T_B (MTTR)	$\int_0^{\infty} t f_B(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$
	Інтенсивність відновлення $\mu(t)$	-	$\frac{1}{T_B}$
Збережувальність	Гама-відсотковий термін збережаності $t_{C\gamma}$	$1 - \int_0^{t_{C\gamma}} f_C(t) dt = \frac{\gamma}{100}$	$\frac{r(t_i) + 1}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$
	Середній термін збережаності	-	-

Закінчення табл.3.3

Властивість надійності	Показник надійності	Формули визначення показників надійності	непараметричний випадок	параметричний випадок	непараметричний випадок
Комплексні показники					
Безвідмовність та ремонтпридатність	Коефіцієнт готовності $A(t)$	$\frac{1}{NT_{РОБ}} \sum_{i=1}^N \xi_i$	$\frac{T_0}{T_0 + T_B}$		
	Коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$	$\frac{\int_0^T R(t) dt}{\int_0^T R(t) dt + (T_P + T_B) + T_B}$	$\frac{t_{СУМ}}{t_{СУВ} + t_{РЕМ} + t_{ОББ}}$		
	Коефіцієнт оперативної готовності $A_{ОГ}$	$\frac{T_0 - \int_0^T R(t) dt}{T_0 + T_B}$	$A(t)R(t)$		

Примітка. N - кількість спостережуваних виробів (випробувань); $n(t)$ - кількість відмов за час t ; n - окреме значення випадкової величини (наробіток до відмови, ресурсу, часу відновлення); d - кількість відмов за час спостереження; Q_i - наробіток i -го виробу; $r(t)$ - кількість відмов i -го об'єкта; $n(t_{(i)})$ - кількість членів варіаційного ряду, передуючих значенню $t_{(i)}$; $n(t)$ - кількість відновлювань працездатного стану у заданий час t ; $T_{РОБ}$ - тривалість експлуатації; ξ_i - сумарний час перебувань i -го об'єкта у працездатному стані; $t_{СУМ}$ - сумарний наробіток усіх об'єктів; $t_{РЕМ}$ - сумарний час простойв внаслідок планових і позапланових ремонтів усіх об'єктів; $t_{ОББ}$ - сумарний час простою усіх об'єктів на ТО

- вибирають ресурси для виробів, настання відмови чи граничного стану яких зумовлено наробітком (наприклад, внаслідок зношення), а терміни служби - календарним часом (наприклад, внаслідок атмосферної корозії); для виробів, зміна технічного стану яких пов'язана як з наробітком, так і з календарним часом, вибирають обидва показники.

Під час експлуатації для аналізу надійності виробів АТ використовують показники надійності.

Показники надійності виробів АТ розподіляють на нормативні, контрольні та фактичні.

Нормативні значення показників надійності встановлюються технічними вимогами до розробки АТ і включаються до експлуатаційної документації.

Контрольні значення показників надійності визначаються експлуатантами за узгодженням із організаціями промисловості, включаються до експлуатаційної документації та призначені для оцінки ступеня зміни надійності виробів АТ за конкретних умов експлуатації.

При аналізі надійності виробів АТ порівнюють фактичні значення показників з нормативними або контрольними і визначають тенденції зміни показників надійності у процесі експлуатації, ступінь їхньої відповідності та вплив режимів і умов експлуатації на надійність АТ.

Фактичні показники надійності класифікують на головні й оперативні.

Для високонадійних виробів АТ у вигляді головних показників надійності використовують інтенсивність відмов $\lambda(t)$ - для оцінки безвідмовності і середній час відновлювання T_B - для оцінки ремонтпридатності виробів АТ. Оперативні показники надійності та формули для їхньої оцінки наведені у табл.3.4.

Оперативні показники надійності характеризують результати реалізації надійності АТ, тобто не стільки визначають властивості об'єктів експлуатації, скільки характеризують ефективність прийнятої системи ТО та якість роботи фахівців щодо своєчасного виявлення і усунення відмов виробів АТ.

Систематична оцінка оперативних показників надійності ПС та їхній аналіз дозволяють:

- порівнювати результати експлуатації різних типів ПС та розроблювати вимоги до підвищення надійності АТ;

- аналізувати якість роботи фахівців експлуатаційних підприємств та удосконалювати технологію і організацію ТО авіатехніки;

- оцінювати ефективність проведених заходів (експлуатаційних, конструктивно-технологічних) для забезпечення надійності АТ і т.ін.

Показники T_n , T_0 , K_n характеризують рівень надійності виробів АТ та прийняту систему ТО авіатехніки. Для зменшення показника K_n слід удосконалити контроль технічного стану виробів, змінити режим ТО, збільшити обсяг регламентних робіт тощо.

Показники q_{kc} , q_{ac} , q_{cc} характеризують рівень безпеки польотів; слід звернути особливу увагу на аналіз причин відмов, що призвели до конкретних ситуацій у польоті. Аналіз ознак виникнення відмов, експлуатаційних властивостей виробів сприяє розробці конструктивно-технологічних заходів щодо забезпечення надійності АТ. При цьому обов'язково слід передбачити і заходи, спрямовані на виявлення відмов за умов експлуатації.

Показники M_{100} , T_{zp} характеризують вплив надійності на регулярність польотів та економічні показники експлуатації АТ. Зниження цих показників досягається за рахунок поліпшення експлуатаційної технологічності АТ, удосконалення організації ТО на оперативних видах ТО, керування процесами ТО виробів АТ.

Показники групи K_{1000} характеризують рівень надійності авіаційних двигунів та їхню контролепридатність за умов експлуатації. Для зниження показників K_{1000} необхідна розробка та впровадження ефективніших методів і засобів діагностування виробів, аналіз тенденції зміни параметрів, що визначають їхній стан тощо.

Таблиця 3.4

Оперативні показники надійності авіаційної техніки

Показник	Формула оцінки
Середній наліт на відмову виробів АТ в польоті	$T_n = \frac{t_{\Sigma}}{m_n}$
Середній наліт на відмову виробів АТ, виявлених при ТО	$T_0 = \frac{t_{\Sigma}}{m_n + m_{TO}}$
Середнє число затримок та відмін рейсу за розкладом через відмови виробів АТ на 100 вильотів	$M_{100} = \frac{m_{zp} \cdot 100}{N}$
Середня імовірність виникнення за 1 год. польоту катастрофічної ситуації	$q_{kc} = \frac{m_{kc}}{t_{\Sigma}}$
Середня імовірність виникнення за 1 год. польоту аварійної ситуації	$q_{ac} = \frac{m_{ac}}{t_{\Sigma}}$
Середня імовірність виникнення за 1 год. польоту складної ситуації	$q_{cc} = \frac{m_{cc}}{t_{\Sigma}}$
Середнє число перерваних зльотів та вимушених посадок на 1000 зльотів	$K_{1000ВП} = \frac{m_{ВП}}{N} \cdot 1000$
Середнє число достроково знятих двигунів на 1000 год. наробітку	$K_{1000ДСД} = \frac{m_{ДСД}}{N} \cdot 1000$
Середнє число вимкнень двигунів в польоті за 1000 год. наробітку	$K_{1000ВИМ} = \frac{m_{ВИМ}}{N} \cdot 1000$
Відносне число відмов виробів АТ в польоті	$K_n = \frac{m_n}{m_n + m_{TO}}$
Середня тривалість затримки рейсу	$T_{zp} = \frac{t_{\Sigma zp}}{m_{zp}}$

Примітки: t_{Σ} - сумарний наліт ПС за розрахунковий період; m_n - сумарна кількість відмов виробів АТ у польоті; m_{TO} - сумарна кількість відмов виробів АТ, виявлених при ТО ПС; m_{zp} - кількість затримок та відмін рейсу; N - кількість вильотів ПС за звітний період; m_{kc} - кількість катастрофічних ситуацій; m_{cc} - кількість складних ситуацій; m_{BP} - кількість вимушених посадок; $m_{дзл}$ - кількість достроково знятих двигунів; $m_{вим}$ - кількість вимкнень двигунів у польоті; $t_{\Sigma zp}$ - сумарний час затримок рейсів.

Дані експлуатації АТ дозволяють обчислити всі оперативні показники за статистикою невеликого обсягу, при цьому слід оцінити точність та вірогідність отриманих оцінок.

Аналіз оперативних показників надійності ускладнюється двома обставинами.

По-перше, надійність оцінюється загалом не одним показником, а їхньою сукупністю. Багато з показників мають мало спільного з точки зору фізичного змісту (наприклад, наліт до відмови, що відбулася з вини технічного складу, і відсоток несправностей, виявлених при проведенні регламентних робіт). Разом з тим ці показники обчислюються на основі єдиного джерела інформації виробів АТ.

По-друге, отримана на основі експлуатації інформація про надійність не зовсім відповідає дійсності. За умов експлуатуючої організації без спеціального обладнання часом дуже важко вірно класифікувати причину відмови. Помилки в класифікації іноді посилюються необ'єктивністю ІТП та його низькою кваліфікацією.

Труднощі вивчення сукупності показників оперативної оцінки надійності вдається подолати, якщо залучити до вирішення задач інженерно-статистичного аналізу надійності апарат багатовимірної математичної статистики і моделювання процесів на ЕОМ.

Стан готовності АТ визначається співвідношенням терміну використання й часу простою. Термін використання є почасовим інтервалом між двома послідовними відмовами або

профілактичними діями, а час простою визначається як сума організаційного часу, часу матеріально-технічного забезпечення, активного часу ремонту та профілактики.

Номенклатура показників ремонтпридатності складається з оцінки обслуговування та ремонту в працевитратах, тривалості й вартості відновлювальних робіт.

Досягнута готовність A_o визначається як імовірність того, що система виявиться працездатною в будь-який момент часу за відомої стратегії обслуговування й ремонту та за ідеальних умов їхньої організації й забезпечення, тобто виключаючи організаційний час і час матеріально-технічного забезпечення при обслуговуванні й ремонті:

$$A_o = \frac{T_{TO}}{T_{TO} + MTTR},$$

де T_{TO} - середній час між двома послідовними керуючими впливами (періодичність ТО);

$MTTR$ - середня тривалість відновлення.

Внутрішня готовність A_a визначається як імовірність того, що система виявиться працездатною в будь-який момент часу при здійсненні стратегії "за потребою" і за ідеальних умов організації та забезпечення ремонту:

$$A_a = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR},$$

де $MTTF$ - середній наробіток до відмови.

Оперативна готовність A_o визначається як імовірність того, що система виявиться працездатною в будь-який момент часу при обслуговуванні і ремонті за встановленою стратегією за реальних умов, тобто з урахуванням витрат часу на організацію і матеріально-технічне забезпечення робіт:

$$A_o = \frac{T_{TO}}{T_{TO} + T_{np}},$$

де T_{np} - середній час простою.

Три способи оцінки готовності дозволяють оцінити:

- готовність об'єкта незалежно від організації та стратегії його відновлення (оцінка A_0);

- готовність об'єкта за умов використання стратегії його технічного обслуговування і ремонту (оцінка A_0);

- готовність об'єкта за умов використання стратегії його технічного обслуговування і ремонту з урахуванням витрат часу на організацію й матеріально-технічне забезпечення робіт (оцінка A_0).

Відзначимо, що прийнятий в стандартах коефіцієнт готовності K_T відповідає оцінці A_0 .

Вимоги та кількісні показники надійності, зазвичай, задаються в технічному завданні на розробку конкретного виробу одночасно з функціональними й параметричними характеристиками. При цьому враховуються:

1) призначення та особливості використання виробу, що створюється, вимоги безпеки й технічного обслуговування для підтримки його надійності в експлуатації;

2) досягнутий рівень надійності зразків або прототипів виробів, що знаходяться в експлуатації, й фактичні кількісні показники надійності комплектуючих елементів, вузлів та агрегатів. При цьому слід враховувати досягнення щодо створення нових матеріалів, технологічних процесів й розвитку методів проектування;

3) зовнішні умови (температура, тиск, волога, заповненість і т.ін. параметри навколишнього середовища), діючі навантаження та режими роботи виробу;

4) методи та критерії підтвердження заданих показників надійності (розрахунками, за результатами випробувань, за термінами експлуатації), а також види та необхідний обсяг випробувань.

Основними документами, що визначають обсяг роботи щодо надійності, є комплексна програма забезпечення надійності, що розробляється для кожної стадії (етапу) створення виробу. Критерієм оцінка правильності та повноти виконання цих робіт є відповідність рівня надійності виробу та його важливих частин заданим вимогам.

Комплексні програми забезпечення надійності розробляються для кожного конкретно створеного виробу відповідно до виданого технічного завдання на його розробку, виробництво та експлуатацію. Вони містять комплекс організаційних, технічних та методичних питань, що вирішуються на усіх стадіях створення виробу, й спрямовані на розв'язування задач щодо забезпечення технологічності і підтвердження цього рівня в експлуатації.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть характеристики надійності виробів та обґрунтуйте їх взаємозв'язок.

2. Визначте закони розподілу напрацювання виробів до відмови та їхні параметри.

3. Визначте моделі надійності виробів АТ та їхній взаємозв'язок з фізичною природою відмов.

4. Які особливості побудови моделей для відновлювальних технічних систем?

5. Які Вам відомі одиничні показники надійності виробів АТ?

6. Вкажіть комплексні показники надійності та формули їхнього розрахунку.

7. Охарактеризуйте критерії згоди та їхнє застосування.

8. Наведіть приклади застосування моделей надійності виробів АТ.

4. ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

4.1. Плани спостережень

Головною метою математичного аналізу надійності АТ є отримання вірогідних оцінок показників надійності та побудова статистичних моделей надійності виробів АТ.

Узагальнення результатів кількісного та якісного аналізів надійності виробів АТ є основою розробки керуючих впливів щодо підвищення та забезпечення надійності АТ, що охоплюють етапи проектування, виробництва, ремонту та експлуатації АТ.

Оцінка показників надійності виробів АТ у загальному вигляді зводиться до визначення типу і параметрів розподілу наробітку до відмови за результатами обмеженої кількості спостережень (вибірковий метод), тобто розглядається результат експерименту (спостережень) деякої частини генеральної сукупності, що містить N значень (реалізацій) випадкових величин x_1, x_2, \dots, x_n , виходячи з яких оцінюють значення досліджуваних характеристик.

Вибірку, що складається з наробітків до відмови усіх елементів, називають повною вибіркою.

Особливістю експлуатації АТ є те, що більшість виробів знімають з експлуатації після відпрацювання ресурсу, тобто спостереження за виробом припиняється раніше, ніж трапилась відмова.

Вибірку, яка складається із наробітків до відмови та наробітків до припинення спостережень, називають цензурованою, а припинення спостережень - цензуруванням.

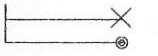
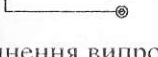
Цензурована вибірка обсягом $N = m + s$ містить низку наробітків $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ об'єкта, які завершилися відмовою, та низку безвідмовних наробітків t_1, t_2, \dots, t_s .

Плани спостережень відображають умови отримання експериментальних даних (час випробування кожного виробу, характер відновлювання об'єктів і т.ін.), що і визначає застосування відповідних формул для оцінки показників надійності та параметрів законів розподілу.

Стандартом прийняті такі позначення планів спостережень: $[NUN]$, $[NUT]$, $[NRT]$, де N - кількість виробів під спостереженнями; U - вироби, що відмовили, які не відновлюються і не замінюються; R - вироби, що відмовили, які замінюють новими; T - встановлена тривалість спостережень кожного виробу. При планах $[NUN]$, $[NUT]$ вироби відновлюють або замінюють

новими, однак результати спостережень над відремонтованими виробами надалі не розглядають.

Введемо наступні графічні позначення:

 повна реалізація (наробіток виробу до відмови);
 неповна реалізація (наробіток виробу до припинення випробувань (цензурування)).

В табл. 4.1 наведені типи експериментальних даних і діаграми їхніх реалізацій.

Така діаграма наглядно й остаточно відображає специфіку статистичного матеріалу щодо результатів експлуатації виробів АТ при різних планах випробувань.

Для отримання точкових оцінок параметрів моделей надійності виробів АТ за цензурованою вибіркою використовується метод максимальної правдоподібності.

Метод максимальної правдоподібності заснований на підбиранні таких значень параметрів розподілу заданого типу, при яких імовірність отримання вибірки, що аналізується, набуває максимального значення. Згідно з методом максимальної правдоподібності утворюють функцію правдоподібності L :

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, Q) = R(T)^{N-n} \prod_{i=1}^n f(t_i, Q),$$

де $R(T)$ - значення функції надійності при $t = T$;

N - кількість підконтрольних виробів;

n - кількість відмов;

$f(t, Q)$ - щільність розподілу наробітку до відмови.

Оцінку параметра Q визначають за рівнянням:

$$\partial \ln \frac{L}{\partial Q} = 0.$$

Функція правдоподібності L складена для цензурованої вибірки. При $n = N$ отримують функцію L для повних даних:

$$L = \prod_{i=1}^N f(t_i, Q)$$

Таблиця 4.1

Типи експериментальних даних

Плани спостережень	Результати спостережень	Діаграми реалізацій
[NUT]		
[NUT]		
[NRT]		

Функція правдоподібності для цензурованої вибірки має вигляд

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + \sum_{j=1}^{N-d} \ln R(t_j)$$

де d - кількість відмов;

t_i - наробіток i -го об'єкта до відмови;

N - кількість підконтрольних виробів;

t_j - наробіток j -го об'єкта.

Побудову моделей надійності здійснюють у такій послідовності:

- формують модель відмов і висувають гіпотезу про вид функції розподілу наробітку виробу до відмови, часу відновлювання і т.ін.;

- оцінюють параметри законів розподілу;

- обчислюють довірчі границі параметрів моделі;

- оцінюють характеристики надійності виробів АТ та будують графіки їхніх змін за наробітком.

Обсяг інформації при експлуатації виробів є величиною випадковою. Для виробу, що містить декілька типів елементів (деталей, блоків, збірних одиниць), характерна велика кількість відмов одних об'єктів, а усіх інших об'єктів – незначна.

Випадковість обсягів, неповнота, не завжди висока якість отриманих експлуатаційних даних, різноманіття і нестандартність їхніх типів - все це спонукає до пошуку та застосування методів і прийомів, які були б здатні забезпечити отримання задовільної достовірності оцінок властивостей виробів.

4.2. Побудова моделі раптових відмов

В період сталого характеру $\lambda(t)$, коли значення $\lambda(t)$ практично не залежать від наробітку й відмови мають раптовий характер, вживають експоненційну функцію розподілу:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \lambda(t) = \text{const.}$$

Розподіл має один параметр і широко використовується для аналізу раптових відмов виробів та складних систем ПС.

Оцінка параметра розподілу залежить від плану випробувань. Точкові оцінки параметра λ визначаються за формулами табл.4.2, а довірчі межі – за формулами табл.4.3.

В табл.4.4. наведені значення $\chi_{2p,N-1}$. Імовірність визначається через довірчу імовірність β з урахуванням значень табл.4.3.

Таблиця 4.2

Формули для визначення точкової оцінки параметра $\hat{\lambda}$

План наглядів	Формула для визначення точкової оцінки $\hat{\lambda}$
[NUT]	$\frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i}$
[NUT]	$\frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i + (N - d)T}$
[NRT]	$\frac{d}{NT}$

Примітка. d – кількість відмов за час нагляду T .

Таблиця 4.3

Формули для визначення довірчих меж

План наглядів	Нижня межа $\hat{\lambda}_H$	Верхня межа $\hat{\lambda}_B$
[NUT]	$\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-\beta, 2N}^2}{2N}$	$\frac{\hat{\lambda} \chi_{1+\beta, 2N}^2}{2N}$
[NUT]	$\frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{\beta}{2}, 2d}^2}{d(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{\beta}{2}, 2d}^2)}$	$\frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d+2}^2}{d(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d+2}^2)}$
[NRT]	$\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-\beta, 2d}^2}{2d}$	$\frac{\hat{\lambda} \chi_{1+\beta, 2d}^2}{2d}$

Примітка. $\chi_{2p,N-1}$ – квантиль χ^2 розподілу

Таблиця 4.4

Значення $\chi_{2p,N-1}$

P	Кількість ступенів свободи N-1					
	5	10	15	20	30	50
0,025	0,83	3,25	6,26	9,59	16,80	32,4
0,050	1,15	3,94	7,26	10,90	18,50	34,8
0,100	1,61	4,87	8,51	12,4	20,6	37,7
0,900	9,24	16,0	2,3	28,4	40,3	63,2
0,950	11,10	18,3	25,0	31,4	43,8	67,5
0,975	12,80	20,5	27,5	34,2	47,0	71,4

Порядок визначення точкової оцінки параметра закону розподілу розглянемо на такому прикладі. Під наглядом знаходилося $N = 20$ виробів на протязі $T = 1000$ год. За цей час відмовило п'ять виробів. Наробіток до відмови $t_i = 100, 200, 500, 800, 900$ год.

Відповідно до умов маємо план нагляду [NUT]. Визначаємо точкову оцінку інтенсивності відмов:

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i + (N - d)T} = \frac{5}{2500 + (20 - 5)1000} = 0,00028 \text{ год}^{-1}.$$

Точкова оцінка середнього значення наробітку до відмови

$$T_{cp}^{\hat{\lambda}} = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{0,00028} = 3571 \text{ год.}$$

Двосторонні довірчі межі для $\hat{\lambda}$ визначаємо з довірчою імовірністю $\beta = 0,9$:

$$\hat{\lambda}_H = \frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2 \right)} = \frac{0,00028 \cdot 20 \cdot 3,94}{5 \left(2 \cdot 20 - 5 + \frac{1}{2} \cdot 3,94 \right)} = 0,00012 \text{ год}^{-1},$$

$$\text{де } \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2d}^2 = \chi_{\frac{1-0,9}{2}, 2 \cdot 20}^2 = \chi_{0,05, 40}^2 = 3,94.$$

Аналогічно

$$\hat{\lambda}_B = \frac{\hat{\lambda} N \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2}{d \left(2N - d + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d}^2 \right)} = \frac{0,00028 \cdot 20 \cdot 21,0}{5 \left(2 \cdot 20 - 5 + \frac{1}{2} \cdot 21,0 \right)} = 0,00052 \text{ год}^{-1},$$

$$\text{де } \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2d+2}^2 = \chi_{0,95, 42}^2 = 21,0.$$

З цього витікає, що з імовірністю 0,9 інтервал $0,00012 \div 0,00052$ покриває невідомий параметр $\hat{\lambda}$.

Імовірність безвідмовної роботи виробу за час t обчислюємо за формулою

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

4.3. Побудова моделей поступових відмов

При відмовах внаслідок зношування й старіння елементів виробів широко використовується нормальний розподіл:

$$R(t) = \frac{c}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt; \quad f(t) = \frac{c}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}; \quad c = 1 \div 1,02.$$

Розподіл має два параметри:

m – математичне очікування випадкової величини;

σ – середнє квадратичне відхилення.

Для оцінки $R(t)$, $f(t)$ використовують табульовану функцію, визначають величину $x = (t-m)/\sigma$ і з допомогою таблиць значення Φ_0 , f_0 визначають характеристики надійності за формулами:

$$R(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi_0 \left(\frac{\tau - m}{\sigma} \right); \quad f(t) = \frac{1}{\sigma} f_0 \left(\frac{\tau - m}{\sigma} \right); \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}.$$

Точкові оцінки параметрів m і σ – за формулами табл.4.5.

Таблиця 4.5

Формули для визначення точкових оцінок параметрів m і σ нормального розподілу

План спостережень	Оцінка параметра	
	\hat{m}	$\hat{\sigma}$
[NUN]	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$	$\left[\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - m)^2}{N - 1} \right]^{\frac{1}{2}}$
[NUT]	$\hat{T} - k(\hat{T} - T)$	$\left[S^2 + k(\hat{T} + T)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

Для плану спостережень [NUT] обчислюють значення \hat{T} і S^2 за формулами:

$$\bar{T} = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d t_i; \quad S^2 = \frac{1}{d-1} \sum_{i=1}^d (t_i - \bar{T})^2,$$

а потім визначають допоміжні коефіцієнти:

$$\rho = \frac{S^2}{(\bar{T} - T)^2}; \quad h = \frac{N-d}{N}.$$

Залежно від значень ρ і h (з табл.4.6) визначають коефіцієнт k .

За значеннями параметрів m і σ визначають інтенсивність відмов $\lambda(t)$, імовірність безвідмовної роботи $R(t)$ і функцію щільності розподілу $f(t)$, які необхідно визначити в межах напрацювання $0 - 2m$ (год).

Для нормального розподілу нижню й верхню довірчу границю середнього значення визначають за формулами:

$$\hat{m}_H = \hat{m} - t_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad \hat{m}_B = \hat{m} + t_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

де t_γ – квантиль розподілу Стюдента;

γ - прийняте значення довірчої імовірності;

N - обсяг вибірки.

Таблиця 4.6

Значення h	Значення коефіцієнта k					
	Значення ρ					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.05	0.053	0.060	0.066	0.070	0.075	0.079
0.10	0.110	0.125	0.136	0.146	0.154	0.162
0.20	0.243	0.270	0.292	0.312	0.329	0.345
0.30	0.402	0.442	0.476	0.505	0.531	0.555
0.40	0.596	0.648	0.680	0.732	0.768	0.800
0.50	0.837	0.901	0.957	1.007	1.053	1.095
0.60	1.145	1.222	1.290	1.351	1.408	1.461
0.70	1.561	1.651	1.732	1.806	1.875	1.940
0.80	2.176	2.280	2.376	2.465	2.548	2.626
0.90	3.283	3.403	3.520	3.628	3.730	3.827

При описі термінів служби підшипників, характеристик міцності, стійкості від втомленості, а також характеристик довговічності механічних систем застосовують розподіл Вейбулла.

Відповідно до розподілу Вейбулла функція і щільність розподілу часу безвідмовної роботи мають вигляд:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right], \quad f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right],$$

де a, b - відповідно параметри масштабу і форми розподілу.

Оцінку параметрів a і b визначають з рівнянь:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = -\frac{db}{a} + \frac{b}{a^{b+1}} \left(\sum_{i=1}^d t_i^b + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^b \right) = 0;$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial b} = \frac{d}{b} - d \ln a + \sum_{i=1}^d \frac{1}{t_i} + a^{-b} \ln a \left(\sum_{i=1}^d t_i^b + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^b \right) - a^{-b} \left(\sum_{i=1}^d t_i^b \ln t_i + \sum_{j=1}^{N-d} t_j^b \ln t_j \right) = 0.$$

Залежно від планів спостережень систему рівнянь спрощують (табл.4.7). Рівняння (табл.4.7) легко розв'язуються на ЕОМ.

Таблиця 4.7

Формули для визначення точкових оцінок \hat{a} і \hat{b} параметрів розподілу Вейбулла

План спостережень	Оцінка параметрів \hat{a} і \hat{b}
[NUN]	$\hat{a} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^b \right]^{\frac{1}{b}} ; \left[\frac{N}{b} + \sum_{i=1}^N t_n t_i \right] \sum_{i=1}^N t_i^b - N \sum_{i=1}^N t_i^b t_n t_i = 0$
[NUT]	$\hat{a} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N t_i^b + (N-d)t_d^b}{d} \right]^{\frac{1}{b}} ;$ $\frac{d}{b} + \sum_{i=1}^d t_n t_i \left[\sum_{i=1}^d t_i^b + (N-d)t_d^b \right] -$ $- m \left[\sum_{i=1}^d t_i^b t_n t_i + (N-d)t_d^b t_n t_d \right] = 0$

Для високонадійних об'єктів експлуатації доцільно використовувати апріорні дані щодо величини параметра форми b . Так, для механічних систем час безвідмовної роботи може бути описаний розподілом Вейбулла, параметр форми обирають з урахуванням умов виготовлення, особливостей експлуатації й ознак руйнування елементів системи.

За табл. 4.8 для кожного елемента визначають цифровий код, який відповідає переважним факторам виготовлення, експлуатації, процесу зношення, а за табл. 4.9. - параметр форми b , який відповідає цифровому коду.

Використання цих таблиць хоча й призводить до похибки в оцінці показників надійності, однак забезпечує добре зіставлення отриманих результатів.

Таблиця 4.8

Визначення цифрового коду

Визначальний фактор	Ознаки прояву фактора	Цифровий код
Домінуючий процес руйнування	Зношування,	1
	втома	2
Стабільність умов експлуатації (інтенсивність використання, кліматичні впливи, рівень обслуговування)	Стабільні	1
	Змінюються в широких діапазонах	2
Рівень технології виготовлення елемента	Високий	1
	Середній	2
Ступінь завантаженості елемента	Навантаження, близькі до максимальних	1
	Середні навантаження	2

Таблиця 4.9

Визначення параметра "b"

Цифрові коди	Межа змінності параметра форми \bar{b}	Цифрові коди	Межа змінності параметра форми \bar{b}
1 2 1 2	3,1 – 2,4	2 2 1 1	2,7 – 1,9
1 2 2 1	2,7 – 2,1	2 1 2 2	2,7 – 1,9
1 2 2 2	2,1 – 1,7	2 2 2 1	2,4 – 1,7
2 1 1 1	3,8 – 2,7	2 2 1 2	2,4 – 1,7
2 1 1 2	3,1 – 2,4	2 2 2 2	2,1 – 1,4

Важливою властивістю функції розподілу, використовуваної як модель відмов, є адекватність моделі, тобто її здатність достатньо точно описувати різні форми розподілів з будь-якими реальними значеннями коефіцієнтів варіації, та визначення оцінок показників надійності, що скорочує витрати, які пов'язані з проведенням випробувань та збиранням статистичної інформації про надійність.

За інших планів спостережень слід керуватися Держстандартом України.

4.4. Оцінка показників надійності

Показники надійності при відомому законі розподілу (параметричний випадок) оцінюють за формулами табл.4.10, які пов'язують обраний тип теоретичного розподілу з показником надійності шляхом підстановки точкових оцінок параметрів розподілів. У ряді випадків параметри розподілів є показниками надійності, наприклад, інтенсивність відмов λ є параметром експоненційного розподілу. При невідомому законі розподілу (непараметричний випадок) точкові оцінки показників надійності визначають за формулами табл. 3.3.

Зміна стану авіаційних виробів при будь-якій обраній для його опису математичній моделі може задаватися як апіорними, так і апостеріорними даними. При призначенні та обґрунтуванні програми ТО можна виходити з даних, зібраних до моменту прийняття рішення про операції з обслуговування (апіорна інформація), а можна враховувати й відомості, одержані у момент прийняття рішення (апостеріорна інформація). Якщо використовується тільки апіорна інформація, то обсяги операцій обслуговування та їхня періодичність є незмінними. На засадах такого принципу будується планово-попереджувальна система ТОiP літаків. Врахування апостеріорної інформації робить правила обслуговування гнучкішими, бо коригує обсяг і періодичність обслуговування залежно від технічного стану літаків. Система експлуатації з такими правилами відноситься до класу систем експлуатації за станом.

Можливість спільної обробки даних, що належать до різних сукупностей, відкриває широкі перспективи для істотного збільшення ефективного обсягу інформації в задачах оцінки надійності технічних пристроїв. Якщо при оцінюванні показників надійності методами, заснованими на моделях однорідної вибірки, прагнуть до забезпечення однорідності вибірки, то новий підхід орієнтує на іншу стратегію: оцінюючи показники надійності, залучити усі можливі джерела інформації про надійність виробів; при цьому використати методи обробки неоднорідних вибірок. Таким чином, проблема підвищення вірогідності статистичних висновків щодо надійності АТ тісно пов'язана із задачами

об'єднання інформації, що отримується з різних джерел. Джерелами інформації служать дані експлуатації виробів АТ за різних умов, матеріали їхніх випробувань, дані випробувань і експлуатації конструктивно-подібних виробів, а також матеріали випробувань виробів на різних стадіях їхньої розробки та постановки на виробництво. Ці дані являються зведеними і не однорідними. Вони не можуть розглядатися як вибіркові значення, що належать до однієї генеральної сукупності. Спільний аналіз такого типу неоднорідних даних є можливим, оскільки існує об'єктивна основа, зумовлена єдністю явищ і процесів, що впливають на результати випробувань.

Таблиця 4.10

Формула для визначення показників надійності

Показники надійності	Закон розподілу		
	експоненційний	нормальний	Вейбулла
Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$	$e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t - \bar{m}}{\bar{\sigma}}\right)$	$e^{-\left(\frac{t}{\bar{a}}\right)^{\bar{b}}}$
Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	$\lambda(t)$	$\frac{1}{\sigma} f_0\left(\frac{t - \bar{m}}{\bar{\sigma}}\right)$ $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t - \bar{m}}{\bar{\sigma}}\right)$	$\frac{\bar{b}}{\bar{a}} \left(\frac{t}{\bar{a}}\right)^{\bar{b}-1}$
Імовірність відновлення $M(t)$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t - \bar{m}}{\bar{\sigma}}\right)$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{\bar{a}}\right)^{\bar{b}}}$
Середній наростаючий час до відмови T_1	$\frac{1}{\lambda}$	\bar{m}	$\bar{a} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\bar{b}}\right)$
Гама-відсотковий термін збереженості	$\frac{1}{\lambda} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\bar{t}_\gamma - \bar{m}}{\bar{\sigma}}\right) = \frac{\gamma}{100}$	$\bar{a} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)^{\frac{1}{\bar{b}}}$

Примітка. $\bar{m}, \bar{\sigma}$ - оцінки параметрів нормального розподілу; \bar{a}, \bar{b} - оцінки параметрів розподілу Вейбулла; $\Phi(x), f_0(x)$ - табульовані функції; $\Gamma(x)$ - гама функція; $\frac{\gamma}{100}$ - регламентована імовірність.

Дослідження щодо складних систем АТ все більше зосереджуються на апостеріорних моделях. Програми ТО можуть дати суттєвий економічний ефект внаслідок повнішого використання інформації про технічний стан літаків, яка накопичується в експлуатуючих підрозділах ЦА.

При вирішенні експлуатаційних задач на основі апріорної інформації доводиться мати справу з аналізом випадкових величин (оцінками параметрів законів розподілу часу безвідмовної роботи, часу відновлювання і т.ін.). При переході до апостеріорних методів виникає потреба звернутися до аналізу випадкових процесів. При цьому значно зростають вимоги до обсягу вихідної інформації, оскільки при аналізі випадкових процесів необхідно вивчати багатовимірні розподіли.

Сучасна теорія надійності, залежно від характеру зміни інтенсивності відмов у часі, розрізняє декілька класів функцій надійності:

- функції надійності зі зростаючою функцією інтенсивності (ЗФІ) відмов. До цього класу відносяться функції розподілу, у яких $\lambda(t)$ зростає у часі;
- функції надійності зі спадаючою функцією інтенсивності (СФІ) відмов. До цього класу відносяться функції розподілу, в яких $\lambda(t)$ спадає у часі;
- функції надійності з вогнутою чи U-подібною функцією інтенсивності відмов. До цього класу відносяться типові для інженерних рішень функції надійності елементів, що мають велику початкову інтенсивність відмов внаслідок припрацювання, і зростання потоку відмов у кінці терміну служби внаслідок старіння;
- функції надійності зі зростаючою у середньому інтенсивністю відмов (ЗСФІ) та інші.

У практичних задачах оцінки надійності або обґрунтування програми обслуговування технічних пристроїв та їхніх елементів методи статистичної перевірки гіпотези про зростання інтенсивності відмов на основі наявних експериментальних даних знаходять ширше застосування, ніж будь-які ознаки належності функції надійності до певного класу чи навіть формули для підрахунку $\lambda(t)$ методом максимальної правдоподібності.

Показники, що характеризують тенденцію зміни надійності АТ за наробітком, використовують при достатньому обсязі статистичних даних для вирішення усіх задач ЦА, складовим фактором яких є властивість безвідмовності: формування регламентних робіт на ТО АТ, оцінка ефективності конструктивно-технологічних доопрацювань, оптимізація режимів контролю й діагностування АТ, розробка рекомендацій щодо підвищення надійності АТ і т.ін.

Для високонадійних виробів АТ використовуються непараметричні методи оцінки показників надійності і, залежно від інформаційної забезпеченості, оцінка $\lambda(t)$ ведеться за відповідними методиками. При аналізі надійності за умов реальної експлуатації при відновленні (заміні) відмовивших виробів одержують не оцінку інтенсивності відмов $\lambda(t)$, а оцінку параметра потоку відмов $z(t)$.

Якщо вважати, що кожний виріб після відмови відновлюється і продовжує працювати як новий, то можна розрахувати щільність розподілення наробітку між відмовами $f(t)$, виходячи з відомостей про $z(t)$, застосовуючи відоме рівняння відновлення:

$$z(t) = f(t) + \int_0^t f(t-x)z(x)dx .$$

Подальше отримання $\lambda(t)$ за відомою $f(t)$ за допомогою класичного переходу не складає особливих труднощів:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} .$$

Похибка в обчисленні $\lambda(t)$ виникає через труднощі розв'язання інтегрального рівняння, яке у практичних розрахунках замінюють сумою

$$z_i = f_i + \sum_{v=0}^i z_v f_{i-v} \delta t ,$$

де δt - крок інтегрування.

Помилка у розрахунках $\lambda(t)$ за даною формулою не перевищує 1%, що дозволяє її практичне застосування у розрахунках показників надійності високонадійних виробів АТ.

Поширення застосування обчислювальної техніки при обробці даних щодо експлуатації складних систем потребує пошуку нових, уніфікованих і динамічних форм наведення статистичних даних та узагальнених непараметричних методів їхньої обробки.

4.5. Моделі формування параметричних відмов виробів АТ

Для дослідження динаміки зростання рівня відпрацювання у процесі випробувань використовують моделі, що встановлюють зв'язок між імовірнісними показниками рівня відпрацювання та технічними характеристиками системи і параметрами умов випробувань.

Найбільш перспективним для дослідження надійності за результатами експериментального відпрацювання є застосування моделей, заснованих на встановленні взаємозв'язку показників надійності з параметрами, які характеризують поведінку систем при різних режимах функціонування, впливах навантажень, поступових відмовах систем.

При використанні моделей «параметр - поле допуску» в процесі випробувань фіксуються зміни параметрів у часі, які пов'язуються з показниками надійності через умови працездатності.

Контроль зводиться до порівняння поточних значень параметрів зі значеннями встановлених допусків.

Процес зміни параметрів виробів АТ є випадковим і залежить від конструктивних особливостей виробів, впливу умов експлуатації, неоднорідності вихідних матеріалів та інших факторів.

Здійснюючи контроль, виміри та реєстрацію параметрів у деякі фіксовані моменти часу, будують функції щільності параметра $X: \varphi(X_1 t_1), \varphi(X_1 t_2), \dots, \varphi(X_1 t_n)$ і визначають їх математичне очікування $m_i(t_i)$ та середнє квадратичне відхилення чи поле розсіювання.

Взаємозв'язок функції щільності розподілу часу до першої

відмови $f(t)$ із одновимірними характеристиками щільності розподілу $\varphi(x,t)$ випадкового процесу $X(t)$ та границею поля допуску зображено на рис.4.1.

Графічна модель дає наочне уявлення про фізичну сутність формування функції щільності $f(t)$ при поступовій зміні контрольованих параметрів виробів, про порушення працездатності яких свідчить вихід значення параметра за границі допуску.

Надійність виробу пов'язана з характеристиками процесу

$$P_{\text{вих}} = \int_{\eta}^{\infty} \varphi(X, t_i) di.$$

В кожному перерізі визначають значення $P_{\text{вих}}$ й оцінюють середнє значення функції щільності $f_{\text{cp}}(t)$

$$f_{\text{cp}} = \frac{P_{\text{вих}}(t + \Delta t) - P_{\text{вих}}(t)}{\Delta t}.$$

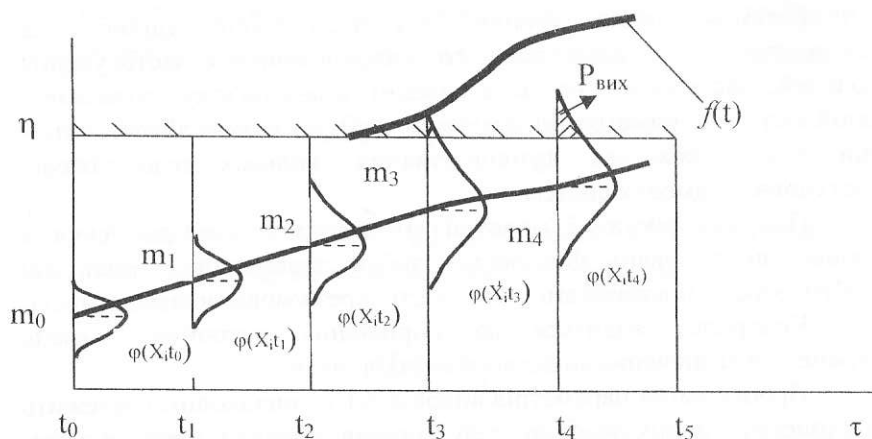


Рис.4.1. Модель формування функції щільності розподілу наробітку до відмови при зміні параметрів, що контролюються

На основі спостереження даних в кожному перерізі визначити математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення та поле розсіювання:

$$m_x(t_j) = \frac{1}{n} \sum X_i(t_j);$$

$$\sigma_x(t_j) = \sqrt{\frac{\sum [X_i(t_j) - m_x(t_j)]^2}{n-1}};$$

$$2l = X_{\text{max}}(t_j) - X_{\text{min}}(t_j).$$

Характеристики $m_x(t_j)$ та $\sigma_x(t_j)$ можна апроксимувати простими математичними виразами

$$m(t_j) = m_0 + kt_j.$$

Визначають імовірність виходу параметра $P_{\text{вих}}(t)$ за межі допуску в кожному перерізі

$$P_{\text{вих}}(t_j) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{\eta - m(t_j)}{\sigma_x(t_j)} \right).$$

Визначають середнє значення функції щільності наробітку виробів до відмови

$$f_{\text{cp}}(t) = \frac{P_{\text{вих}}(t + \Delta t) - P_{\text{вих}}(t)}{\Delta t}$$

і потім будують графіки зміни $f_{\text{cp}}(t)$ від наробітку.

За умов гострого дефіциту часу та недостатньої статистики відмов проводять вибір моделі функції щільності наробітку виробів до відмови $f_{\text{cp}}(t)$ на основі фізичного обґрунтування цієї моделі.

Імовірнісно-фізичні моделі (DM-, DN- і α -розподіли) спеціально побудовані для опису відмов об'єктів на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які зумовлюють відмови. На відміну від імовірнісних моделей вони є фізично обґрунтованими моделями, які враховують фізичну природу відмов та дозволяють

для оцінки надійності використовувати характеристики фізичних явищ, які формують відмови об'єктів.

Типові моделі випадкових фізичних процесів деградації наведені на рис.4.2, де показано реалізації визначальних параметрів для сукупності однотипних об'єктів.

Наведені моделі відповідають широкому класу фізичних процесів деградації (втома, зношування, корозія, старіння тощо). Усі зовнішні чинники, які визначають надійність та пов'язані з конструкцією, властивостями використовуваних матеріалів, технологією виготовлення, рівнем виробництва й експлуатації, у кінцевому підсумку впливають на нахил (середню швидкість процесів деградації) і розсіяння реалізацій, не змінюючи схеми формалізації і типу розподілу. Тип розподілу у схемі формалізації, яка розглядається, визначається характером фізичного процесу деградації. Зокрема, детермінованим, монотонним чи немонотонним видом його реалізацій.

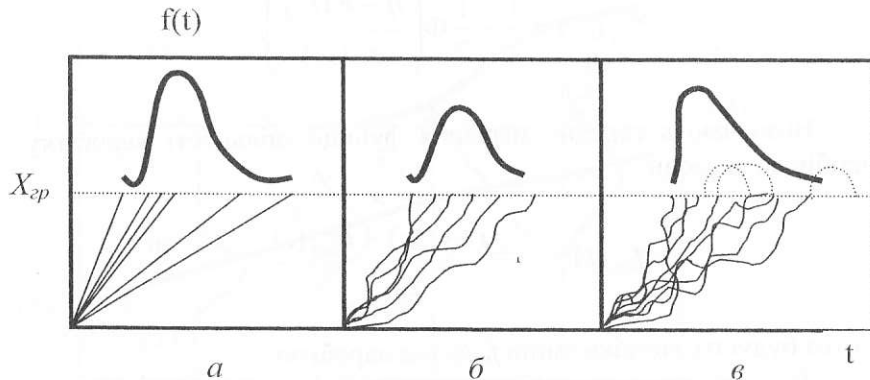


Рис.4.2. Моделі випадкових процесів деградації і схем формування розподілу наробітку до відмови:

а – віяловий процес (α -розподіл); б – марковський монотонний процес (DM-розподіл); в – марковський немонотонний процес (DN-розподіл)

Розглянемо схему побудови закону розподілу відмов для віялового випадкового процесу (рис.4.2, а). Приймають, що швидкість змінювання визначального параметра має априорі

відомий розподіл. Тоді на підставі правила отримання закону розподілу функції випадкового аргументу визначають розподіл наробітку до граничного рівня (досягнення межі області працездатності). Якщо випадковий аргумент (швидкість змінювання визначального параметра) описується нормальним розподілом, то отримують α -розподіл наробітку до відмови.

Параметри α -розподілу мають таку інтерпретацію:

- параметр масштабу β дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра (нормованій на граничне значення), помноженої на коефіцієнт варіації цієї швидкості;

- параметр форми α дорівнює зворотній величині коефіцієнта варіації швидкості змінювання визначального параметра.

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим віяловим процесом типу (рис.4.2, а), то у такому випадку розподіл відмов буде апроксимуватися α -розподілом (табл.4.11).

Таблиця 4.11

Основні характеристики α -розподілу

Характеристика α -розподілу	Розрахункова формула
Щільність імовірності	$f(t) = \frac{\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\alpha t - \beta)^2}{2t^2}\right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = \Phi\left(\frac{\alpha t - \beta}{t}\right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\beta - \alpha t}{t}\right)$
Математичне очікування	$M(t) = \beta / \alpha (1 + 1 / \alpha^2)$
Дисперсія	$D(t) = \beta^2 / \alpha^4 (1 + 8 / \alpha^2)$

Характеристики процесу деградації повністю визначаються початковим станом (якістю вироблення зразків) і не залежать від

механо-фізико-хімічних процесів деградації, які відбуваються в об'єктах під впливом зовнішніх умов та часу.

Оцінки параметрів на підставі вимірювання характеристик процесу деградації (змінювання визначального параметра) розраховують за формулами:

$$\tilde{\beta} = \frac{(X_p - X_0)}{\tilde{q} \cdot \tilde{V}_q}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{1}{\tilde{V}_q}; \quad \tilde{q} = \frac{(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)}{(t_2 - t_1)};$$

$$\tilde{V}_q = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\tilde{X}_1} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} - \tilde{X}_1)^2}{N-1} \right]^{1/2} + \frac{1}{\tilde{X}_2} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_{2i} - \tilde{X}_2)^2}{N-1} \right]^{1/2} \right\},$$

де $\tilde{X}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i}$; $\tilde{X}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i}$ - середні значення визначального параметра на момент першого та другого вимірів ($t_2 \gg t_1$) відповідно.

Схема формалізації закону розподілу відмов (рис.4.2, б, в) полягає у наступному. Обидві моделі подаються однорідним марковським процесом дифузійного типу. Визначення розподілу наробітку до першої відмови об'єктів у такому випадку зводиться до вирішення завдання першого досягнення процесом межі ділянки (граничного рівня).

Розв'язування рівняння потребує встановлення граничних умов та виду реалізації процесу деградації (монотонного чи немонотонного характеру), при цьому отримують відповідно дифузійний монотонний чи дифузійний немонотонний розподіл наробітку до відмови.

Параметри двопараметричних дифузійних розподілів мають фізичну інтерпретацію:

- параметр масштабу μ дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра (нормованого на граничне значення);

- параметр форми ν дорівнює коефіцієнту варіації швидкості змінювання визначального параметра.

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з монотонними реалізаціями (рис.4.2, б), то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним монотонним розподілом (DM-розподіл) (табл.4.12).

Незворотний характер мають процеси руйнування у разі втоми, механічного зношення, корозії та старіння, тобто це процеси, які притаманні механічним об'єктам.

Таблиця 4.12

Основні характеристики DM- розподілу

Характеристика DM-розподілу	Розрахункова формула
Щільність ймовірності	$f(t) = \frac{(t + \mu)}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DM(t; \mu; \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Модель надійності (ймовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Математичне очікування	$M(t) = \mu(1 + \nu^2/2)$
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 \nu^2 (1 + 5\nu^2/4)$
Коефіцієнт варіації	$V(t) = \nu(4 + 5\nu^2)^{1/2} / (2 + \nu^2)$

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з немонотонними реалізаціями (рис.4.2, в), чи у загальному випадку з монотонними і немонотонними реалізаціями, то розподіл відмов буде апроксимуватися дифузійним немонотонним розподілом (DN-розподіл) (табл.4.13).

Немонотонний характер змінювання деяких фізичних параметрів спостерігається у виробках електронної техніки, наприклад, у випадку електроміграції при тонкоплівковій

металізації, у випадку генерації та пересування зарядів на поверхні кристалу напівпровідникових структур тощо. Таким чином, процеси деградації виробів електронної техніки поряд з монотонними реалізаціями (скупчення дислокацій, пластичні деформації, механічне руйнування через втому) внаслідок електричних явищ мають і немонотонні реалізації. Тому у загальному випадку прийнято розглядати деградацію електронної техніки як процес з немонотонними реалізаціями.

Таблиця 4.13

Основні характеристики DN-розподілу

Характеристика DN-розподілу	Розрахункова формула
Щільність імовірності	$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{v\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]$
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DN(t; \mu; v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + e^{2v^{-2}} \Phi\left(\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - e^{2v^{-2}} \Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Математичне очікування	$M(t) = \mu$
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 v^2$
Коефіцієнт варіації	$V(t) = v$

Оцінки параметрів на підставі вимірювання характеристик процесу деградації (змінювання визначального параметра) для DM- та DN-розподілів розраховуються за формулами:

$$\tilde{\mu} = \frac{(X_{cp} - X_0)}{\tilde{q}}; \quad \tilde{v} = \tilde{V}_q; \quad \tilde{q} = \frac{(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)}{(t_2 - t_1)}$$

$$\tilde{V}_q = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\tilde{X}_1 - X_{\min}} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} - \tilde{X}_1)^2}{N-1} \right]^{1/2} + \frac{1}{\tilde{X}_2 - X_{\min}} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_{2i} - \tilde{X}_2)^2}{N-1} \right]^{1/2} \right\},$$

де X_{\min} - мінімальне значення визначального параметра.

Якщо з високою вірогідністю встановлено, що відмови зумовлені незворотними процесами типу механічне зношення, втома (об'ємна, поверхнева) та корозія, то за теоретичну модель відмов слід прийняти DM-розподіл. Для всіх механічних елементів (деталей машин і апаратури) найбільш придатною моделлю відмов є DM-розподіл, при цьому оцінка коефіцієнта варіації може бути в інтервалі від 0,3 до 0,7.

Якщо з високою вірогідністю встановлено, що об'єкт складається з елементів, які мають вироби електронної техніки (інтегральні мікросхеми, напівпровідникові прилади, конденсатори тощо) чи інші електротехнічні вироби, то для таких об'єктів більш придатною моделлю відмов є DN-розподіл.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть плани спостережень та їхні особливості.
2. Наведіть алгоритми оцінки параметрів моделей надійності та довірчих меж.
3. Вкажіть особливості оцінки параметрів моделей надійності при повних та цензурованих статистичних даних.
4. Охарактеризуйте параметричний метод оцінки показників надійності.
5. Наведіть алгоритми непараметричного оцінювання показників надійності.
6. Назвіть особливості оцінки адаптивних показників надійностей виробів АТ.
7. Визначте моделі формування технічного стану АТ в експлуатації.

5. ПРИНЦИПИ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ АТ

5.1. Надійність складних систем

Забезпечення надійності складних систем АТ є однією з найактуальніших проблем у ЦА. Важливість функцій, які виконують різні системи ПС, та зростаюча вартість їхньої експлуатації зумовлюють необхідність забезпечення безвідмовної роботи АТ і вибір оптимальних режимів її експлуатації.

Для розрахунку слід мати модель надійності системи, яку складають на основі функціональної схеми системи. У вигляді моделей під час розрахунку надійності складних систем АТ найчастіше застосовують структурні схеми. До складання структурної схеми роблять аналіз функціонування системи та елементів, перераховують і описують можливі відмови елементів, оцінюють вплив кожного з них на працездатність системи.

При цьому вважають, що відмови елементів незалежні, а система й елементи можуть знаходитися лише у двох станах: працездатному і непрацездатному.

При складанні структурної схеми функціональні зв'язки між елементами замінюються логічними, які характеризують безвідмовну роботу системи залежно від стану її елементів. Елемент, при відмові якого відмовляє вся система, вважають послідовно з'єднаним у логічній схемі (рис.5.1), а елемент, відмова якого не веде до відмови системи, включають до паралельного з'єднання у логічній схемі (рис.5.2).



Рис.5.1. Послідовне з'єднання елементів

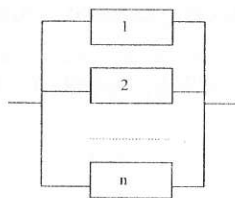


Рис.5.2. Паралельне з'єднання елементів

Якщо у загальному випадку ми маємо n елементів, імовірність безвідмовної роботи кожного з яких дорівнює відповідно R_i , то для послідовного з'єднання елементів формула розрахунку імовірності безвідмовної роботи системи матиме вигляд

$$R_{noc} = \prod_{i=1}^n R_i = R_1 R_2 \dots R_n .$$

Підставляючи замість імовірності безвідмовної роботи елементів

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right),$$

отримаємо формулу показників безвідмовності системи з послідовно з'єднаними елементами

$$R_{noc}(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^N \left(\int_0^t \lambda_i(t) dt\right)} .$$

При експоненціальному розподіленні наробітку до відмови отримаємо

$$R_{noc}(t) = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^N \lambda_i dt} .$$

При $\sum_{i=1}^N \lambda_i t \ll 1$ можна використовувати наближену оцінку

$$R_{noc}(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i t .$$

Для паралельного з'єднання елементів імовірність безвідмовної роботи дорівнює

$$R_{нар} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)]$$

Підставляючи замість імовірності безвідмовної роботи

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right),$$

отримаємо для системи з паралельним з'єднанням елементів

$$R_{нар}(t) = 1 - \prod_{j=1}^K \left(1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t) dt}\right)$$

При експоненціальному законі розподілення наробітку до відмови отримаємо

$$R_{нар}(t) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - e^{-\lambda_j t})$$

Залежність імовірності безвідмовної роботи системи $R_{сист}$ від імовірності безвідмовної роботи елементів $R_{ел}$ при послідовному і паралельному з'єднаннях наведена на рис.5.3.

Як показано на рис.5.3, при паралельному з'єднанні елементів підвищується безвідмовність системи. При паралельному з'єднанні зберігається працездатність системи при відмові окремих елементів. Ця можливість реалізується при резервуванні.

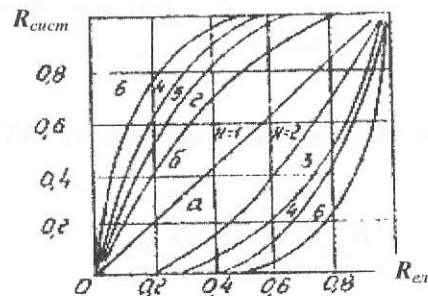


Рис. 5.3. Залежність імовірності безвідмовної роботи системи $R_{сист}$ від імовірності безвідмовної роботи елементів $R_{ел}$ й кількості елементів N : а – при послідовному з'єднанні; б – при паралельному з'єднанні

Для забезпечення безпеки польотів на ПС передбачено резервування як системи в цілому, так і окремих агрегатів. При резервуванні використовують такі поняття: основний, резервний та резервованій елементи.

Основний елемент – елемент об'єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

Резервний елемент – елемент, призначений для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.

Резервованій елемент – основний елемент, на випадок відмови якого в об'єкті передбачені один або декілька резервних елементів.

Сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, що використовуються для резервування, утворюють резерв.

Структурне резервування – це резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта.

Почасове резервування – резервування із застосуванням резервів часу.

Інформаційне резервування – резервування із застосуванням резервів інформації.

Функціональне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції.

Навантажувальне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта сприймати додаткові навантаження поверх номінальних.

Навантажений резерв – резерв, що містить один чи декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента.

Полегшений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом.

Невантажений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у невантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента.

Резервування з відновлюванням – резервування, в якому відновлення основних і (чи) резервних елементів, у випадку їхньої відмови, технічно можливо без порушення працездатності об'єкта в цілому та передбачено експлуатаційною документацією.

Резервування без відновлення – резервування, при якому відновлення основних і (чи) резервних елементів у випадках їхньої відмови, технічно неможливо без порушення працездатності об'єкта в цілому та (або) не передбачено експлуатаційною документацією.

За рівнем резервованих елементів (об'єктів) поділяють на: загальне, роздільне та змішане резервування.

При складанні моделі надійності системи необхідно враховувати всі види резервування як засобу підвищення надійності АТ.

Загальне резервування – резервування, в якому резервується об'єкт в цілому. При загальному резервуванні систем ПС (рис.5.4) із навантаженим резервом імовірність безвідмовної роботи

$$R_0(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) \right]^{m+1},$$

де n - кількість послідовних елементів головної системи;

m - кратність резервування.

Середній час безвідмовної роботи резервованої системи

$$T_{Ocp} = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{cp} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1},$$

де λ_c і T_{cp} - відповідно інтенсивність відмов і середній час безвідмовної роботи головної системи.

Роздільне резервування – резервування, в якому резервуються окремі елементи об'єкта чи їх групи. При роздільному резервуванні з навантаженим резервом (рис.5.5) імовірність безвідмовної роботи

$$R_p(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - R_i(t)]^{m_i+1} \right\},$$

де m_i - кратність резервування i -го елемента.

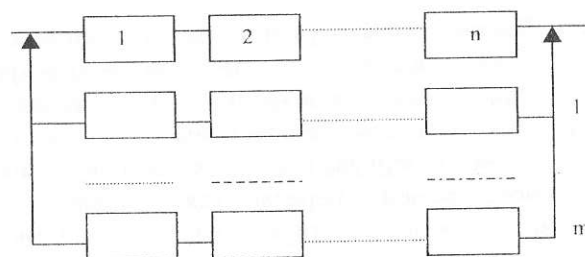


Рис.5.4. Загальне резервування

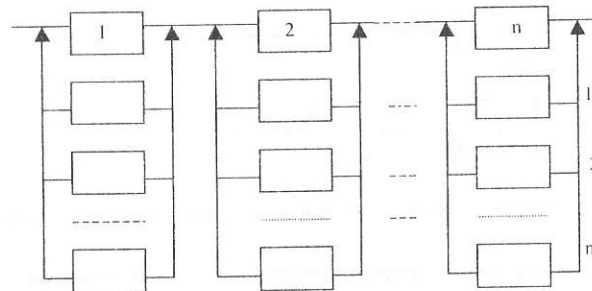


Рис.5.5. Роздільне резервування

Роздільне резервування при однаковій кількості елементів більш вигідне з точки зору безвідмовності. Однак при роздільному резервуванні ускладнюється перевірка працездатності системи під час її технічного обслуговування.

Змішане резервування – поєднання різних видів резервування в одному об'єкті. Використовується в системах, відмови яких безпосередньо впливають на безпеку польотів.

За способом включення резервного елемента системи через виникнення відмови основного елемента розрізняють стателе, заміщувальне та ковзне резервування.

Стале резервування (паралельне) – резервування, в якому використовують навантажений резерв і в якому, якщо відмовляє будь-який елемент в резервованій групі, виконання об'єктом потрібних функцій забезпечується без перемикань рештою елементів. Такому резервуванню відповідають наведені структурні схеми (рис.5.6). Перевагою сталого резервування є постійна готовність резервного елемента до використання, тому воно використовується у відповідальних системах, відмови котрих

впливають на безпеку польотів, наприклад, в системах управління. До недоліків можна віднести те, що при такому резервуванні відбувається таке саме зношування та старіння резервних елементів, як і при основному резервуванні.

Заміщувальне резервування – це резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента. Структурна схема надійності системи при такому резервуванні наведена на рис.5.6.

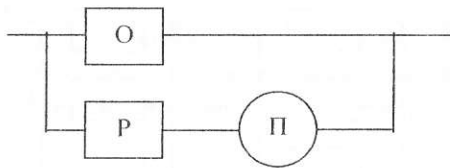


Рис.5.6. Структурна схема надійності системи при заміщувальному резервуванні:

O – основний елемент; *P* – резервний елемент; *П* – перемикач

Імовірність безвідмовної роботи системи при заміщувальному резервуванні визначається за формулою

$$R_{ps}(t) = 1 - (1 - R_o)(1 - R_p R_n),$$

де R_o , R_p , R_n – імовірності безвідмовної роботи основного та резервного елементів і перемикача, відповідно.

Ковзне резервування – заміщувальне резервування, в якому група основних елементів резервується одним чи декількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який з елементів цієї групи у випадку його відмови.

Кратність резерву – відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними елементів, виражене нескоротним дробом. При цьому кратність резерву при дублюванні складе один до одного, при двократному резерві – два до одного, при трикратному – три до одного.

Визначимо кратність резервування ($K - 1$) до одного на прикладі структурної схеми надійності системи при заміщувальному резервуванні (рис.5.7); задані імовірності

безвідмовної роботи системи $R_c(t) = R_{zao} = 0,9998$, основного та резервного елементів $R_e(t) = 0,95$, перемикача – $R_n(t) = 0,98$.

Імовірність безвідмовної роботи такої системи при заданому рівні безвідмовності визначається за формулою

$$R_{zao} = 1 - (1 - R_e(t))(1 - R_e(t)R_n(t))^{K-1}$$

або

$$1 - (1 - R_e(t))(1 - R_e(t)R_n(t))^{K-1} = 1 - R_{zao}$$

Звідси знайдемо кратність резервування

$$K - 1 = \frac{\lg(1 - R_{zao}) - \lg(1 - R_e(t))}{\lg(1 - R_e(t)R_n(t))}.$$

Кратність резервування

$$K - 1 \geq \frac{\lg(1 - 0,9998) - \lg(1 - 0,95)}{\lg(1 - 0,95 \cdot 0,98)} = 3,3.$$

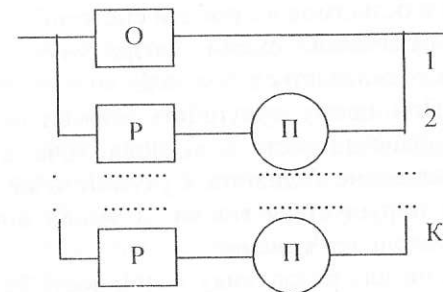


Рис.5.7. Структурна схема надійності системи при заміщувальному резервуванні:

O – основний елемент; *P* – резервний елемент; *П* – перемикач

Тому, округлюючи у більший бік, отримаємо кратність резервування чотири до одного, що забезпечує імовірність безвідмовної роботи $R_c(t) \geq R_{zao} = 0,9998$, якщо безвідмовність кожного елемента недостатня.

Під час розрахунку і дослідження характеристик надійності складних функціональних систем АТ вихідними даними є показники надійності та моделі відмов складових елементів системи, критерії відмови і принципова схема системи, методи і способи включення резервних елементів, характеристики засобів контролю й діагностування виробів АТ.

5.2. Аналіз надійності функціональних систем методом структурних схем

Метод структурних схем передбачає побудову розрахункової схеми аналізу надійності функціональної системи із ланок послідовно та паралельно з'єднаних елементів, що виконують деякі функції й надають можливість оцінки показників надійності системи за даними про надійність її елементів.

Аналіз надійності функціональної системи методом структурних схем виконується в такому порядку:

- описання принципів побудови та функціонування системи на основі розглядання її принципової схеми;

- визначення умов безвідмовної роботи системи;

- побудова структурної схеми розрахунку показників надійності системи, що складається з послідовно та паралельно з'єднаних елементів. При цьому сукупність елементів, для яких необхідною умовою працездатності є відмова хоча б одного з елементів, утворює послідовне з'єднання. Сукупність же елементів, працездатність котрих порушується тільки за умови відмови усіх елементів, утворює паралельне з'єднання;

- складання виразів для розрахунку імовірності безвідмовної роботи системи та її ланок (блоків), які містять послідовно та паралельно з'єднані елементи;

- підготовка вихідних даних щодо безвідмовності елементів системи;

- розрахунок імовірності безвідмовної роботи системи за даними про безвідмовність її елементів.

Вигляд з'єднання елементів в структурній схемі не завжди збігається з виглядом їх з'єднання в принциповій схемі й залежить від впливу відмов елементів на працездатність функціональної

системи, тобто визначається виглядом та характером відмов елементів.

Розробка та побудова правильної структурної схеми потребує чіткого визначення поняття відмови елемента та впливу цієї відмови на працездатність системи.

Аналіз надійності функціональної схеми методом структурних схем розглянемо на прикладі паливної системи, принципова схема котрої наведена на рис.5.8. Імовірність безвідмовної роботи елементів відома. Потрібно визначити імовірність безвідмовної роботи паливної системи.

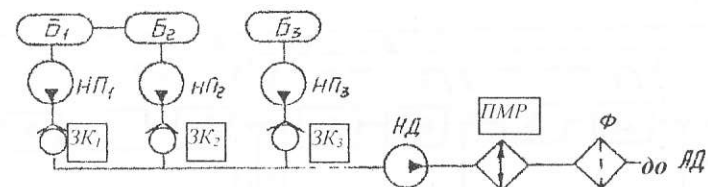


Рис. 5.8. Принципова схема паливної системи

Принципи побудови та функціонування паливної системи: паливо подається в авіадвигун АД зі зв'язаних баків B_1 та B_2 як підкачуючим насосом $НП_1$ через зворотний клапан $ЗК_1$, так й насосом $НП_2$ через зворотний клапан $ЗК_2$. Далі з усіх баків паливо подається через насос двигуна $НД$, паливно-масляний радіатор $ПМР$ і фільтр Φ . За такою схемою відмова одного з баків, насосів та зворотних клапанів не призведе до відмови системи, тому що існують резервні ланки.

Умови безвідмовності паливної системи, ґрунтуючись на вимогах безпеки польотів, полягають в забезпеченні необхідної витрати палива до повної виробки його з баків на усіх режимах роботи двигуна у польоті. При такому визначенні умов безвідмовності за наробіток системи приймається час польоту, протягом якого паливо повністю вироблюється з баків.

Побудова структурної схеми розрахунку надійності системи проводиться у припущенні, що кожний елемент може підлягати тільки одній відмові й може знаходитися в одному з двох станів: працездатному (подія безвідмовності) та непрацездатному (подія –

відмова). При побудові структурної схеми враховується, що частина елементів схильна до резервованих відмов. До таких елементів відносять баки, насоси підкачки та зворотні клапани. З урахуванням взаємозв'язку баків B_1 і B_2 ланка структурної схеми, що означає подію безвідмовної роботи насоса підкачки й зворотного клапану першого бака, з'єднується паралельно з ланкою події безвідмовної роботи насоса підкачки й зворотнього клапану другого бака. В свою чергу, ланка подій безвідмовної роботи перших двох баків, їх насоси підкачки й зворотних клапанів з'єднується паралельно з ланкою подій безвідмовної роботи третього бака і його насоса підкачки й зворотного клапану (рис.5.9).

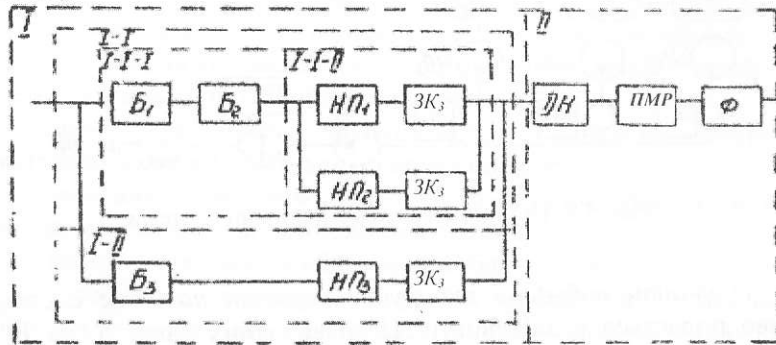


Рис. 5.9. Структурна схема надійності паливної системи

Структурна схема надійності паливної системи (рис. 5.10.) подана у вигляді блоків (підблоків), з'єднаних послідовно (паралельно).

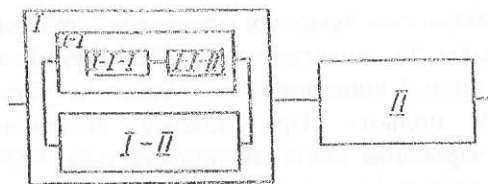


Рис.5.10. Відокремлення блоків в структурній схемі надійності паливної системи

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи паливної системи виконується спочатку на рівні блоків, а потім на рівні елементів.

На рівні блоків (рис.5.10) отримаємо:

$$R_{сист} = R_I R_{II} = (1 - (1 - R_{I-1} R_{I-1I}) (1 - R_{I-II})) R_{II},$$

$$R_I = 1 - (1 - R_{I-1}) (1 - R_{I-II});$$

$$R_{I-1} = R_{I-1-1} R_{I-1-II}.$$

На рівні елементів (рис.5.8) отримаємо

$$R_{I-1-1} = R_{B1} R_{B2},$$

$$R_{I-1-II} = 1 - (1 - R_{НП1} R_{КЗ1}) (1 - R_{НП2} R_{КЗ2}),$$

$$R_{I-II} = R_{B3} R_{НП3} R_{КЗ3},$$

$$R_{II} = P_{НП} P_{ПМР} P_{Ф}.$$

Для паливної системи модель розрахунку імовірності роботи паливної системи має вигляд

$$R_{сист} = (1 - (1 - R_{B1} R_{B2}) (1 - (1 - R_{НП1} R_{КЗ1})(1 - R_{НП2} R_{КЗ2}) \cdot (1 - R_{B3} R_{НП3} R_{КЗ3}))) R_{НП} R_{ПМР} R_{Ф}.$$

Для порівняльної оцінки імовірності безвідмовної роботи визначається за 1 год. наробітку. Важливою характеристикою безвідмовності системи є також імовірність безвідмовної роботи за середній час безпосадкового польоту ЛА.

Ускладнення систем сучасної АТ веде до появи нових якостей, які значно ускладнюють проведення досліджень надійності класичними методами, що засновані на зображенні складних систем у вигляді послідовних чи паралельних з'єднань.

Одним з характерних недоліків розрахунку надійності складних систем на основі структурних схем є припущення про жорстку фіксацію значень імовірності безвідмовної роботи елементів без урахування динаміки змін процесів у часі. Для механічних систем АТ типовими є відмови через розрегулювання, зношення, руйнування від втоми, вплив корозії, тобто процесів, що відбуваються у часі. Крім того, у системах АТ існує тісний

взаємозв'язок елементів системи, які взаємодіють між собою під час функціонування об'єктів. Викладені методи розрахунку надійності не враховують ці зв'язки, внаслідок чого розрахунок надійності нерезервованих систем дає зменшені результати, а розрахунок систем з навантаженим резервуванням - збільшені.

5.3. Аналіз надійності функціональних систем методом логічних схем

Одним із методів дослідження надійності складних систем є метод логічних схем, математична сутність якого полягає у використанні функції алгебри-логіки для аналітичного запису умов працездатності систем ПС та їхнього суворого взаємозв'язку з імовірнісними функціями. Методи алгебри-логіки дозволяють зобразити умови безвідмовної роботи системи у вигляді логічного керування, що відображає функціональний взаємозв'язок елементів системи.

При аналізі надійності складних багатофункціональних систем, елементи яких можуть мати декілька видів залежних відмов, неможливо дотримуватися необхідних умов для використання методу структурних схем. В таких випадках слід використовувати метод логічних схем.

В логічній схемі, на відмінність від структурної, припускається існування ланок із залежними подіями й повторення ланок однакового змісту.

Аналіз надійності функціональних систем методом логічних схем виконується в такому порядку:

- визначається умова безвідмовності системи залежно від поєднання можливих відмов елементів або ланок;

- будується логічна схема умов безвідмовності системи з низкою логічних зв'язків працездатності системи й допустимих відмов окремих елементів;

- складається алгебраїчне рівняння подій безвідмовності системи й розрахункове рівняння її імовірності безвідмовної роботи з використанням операцій алгебри логіки;

- підготовляються вихідні дані щодо безвідмовності елементів систем;

- визначаються імовірності безвідмовної роботи системи за даними про безвідмовність елементів системи.

Аналіз надійності системи методом логічних схем розглянемо на прикладі системи, яка складається з двох паралельно з'єднаних фільтрів та двох послідовно з'єднаних з ними агрегатів (рис.5.11). Визначимо імовірність безвідмовної роботи системи.

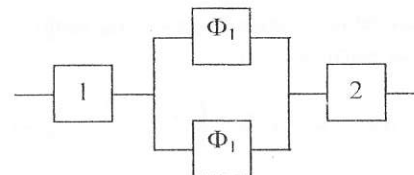


Рис. 5.11. Принципова схема системи

Кожний з фільтрів (Φ_1 та Φ_2) може мати по два види відмови: через засмічення сітки з імовірністю відмови q'_{Φ} та розривання сітки з імовірністю q''_{Φ} , тому розрахунок надійності слід проводити методом логічних схем.

Умова безвідмовності системи формулюється таким чином. Система буде працювати безвідмовно, якщо:

- усі елементи працюють безвідмовно;
- виникне відмова за загорянням одного фільтра за умови безвідмовної роботи інших елементів;
- виникне відмова через загоряння другого фільтра за умови безвідмовної роботи інших агрегатів.

Відмова фільтра через розривання сітки є неприпустимою, тому що при цьому не буде забезпечуватися очищення робочої рідини від механічних домішок.

Логічна схема надійності системи наведена на рис.5.12.

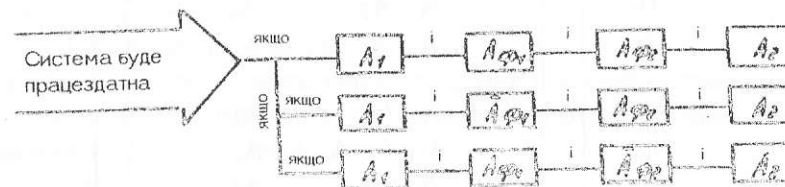


Рис. 5.12. Логічна схема надійності системи

Складемо алгебраїчне рівняння подій та розрахункове рівняння імовірності безвідмовної роботи системи:

$$S = A_1 A_{\phi 1} A_{\phi 2} A_2 + A_1 \bar{A}_{\phi 1} A_{\phi 2} A_2 + A_1 A_{\phi 1} \bar{A}_{\phi 2} A_2;$$

$$R_{\text{сист}} = R_1 R_{\phi 1} R_{\phi 2} R_2 + R_1 q'_{\phi 1} R_{\phi 2} R_2 + R_1 R_{\phi 1} q'_{\phi 2} R_2 =$$

$$= R_1 \cdot R_2 \cdot (R_{\phi 1} \cdot R_{\phi 2} + q'_{\phi 1} \cdot R_{\phi 2} + R_{\phi 1} \cdot q'_{\phi 2}).$$

Враховуючи існування двох видів відмов фільтрів, визначимо імовірність їх безвідмовної роботи

$$P_{\phi} = 1 - q_{\phi 1} = 1 - (q'_{\phi} + q''_{\phi}) = 1 - q'_{\phi} - q''_{\phi}.$$

Приймаючи $q = q_1 = q_2$ й переходячи до імовірностей відмови елементів, отримаємо

$$R_{\text{сист}} = (1 - q)^2 (1 - q'_{\phi 1} - q''_{\phi 2})(1 - q'_{\phi 2} - q''_{\phi 2}) +$$

$$+ q'_{\phi 1} (1 - q'_{\phi 2} - q''_{\phi 2}) + (1 - q'_{\phi 1} - q''_{\phi 2}) q'_{\phi 2}.$$

За умови $q'_{\phi 1} = q'_{\phi 2}$ й $q''_{\phi 1} = q''_{\phi 2}$ визначимо

$$R_{\text{сист}} = (1 - q)^2 (1 - q'_{\phi} - q''_{\phi})(1 - q'_{\phi} - q''_{\phi} + 2 q'_{\phi}).$$

5.4. Аналіз надійності функціональних систем матричним методом

Стани системи, в яких вона може знаходитись у проміжку часу, що розглядається, залежать від станів комплектуючих елементів. Для переліку всіх можливих станів системи складають матрицю несумісних станів, яка для системи з n елементів має вигляд:

H_0		A_1	A_2	...	A_n	
H_1		A_1	A_2	...	A_n	
\vdots		\vdots	\vdots	...	\vdots	
H_n		A_1	A_2	...	A_n	
$H_{\alpha\beta}$		A_1	A_2	A_{α}	A_{β}	A_n
$H_{1\dots n}$		A_1	A_2	...	A_n	

де H_0 - гіпотеза працездатності всіх елементів;

$A_i(A_{ij})$ - працездатний (непрацездатний) стан i -го елемента;

H_i - гіпотеза відмови i -го елемента;

$H_{\alpha\beta}$ - гіпотеза відмови двох елементів α і β .

Кожний із станів системи, зазначений у матриці, перевіряється за логічною умовою на працездатність. Імовірність перебування системи у будь-якому стані визначають за формулою

$$R_{CT} = \prod_{k=1}^{n-m} R(A_{i_k}) \prod_{l=1}^m R(\bar{A}_{i_l}),$$

де m - кількість відмовних елементів.

Імовірність безвідмовної роботи складної системи АТ визначають за формулою додавання імовірностей несумісних подій:

$$R_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^r R_{cm_j},$$

де r - загальна кількість працездатних станів системи.

Застосування матричного методу розрахунків надійності функціональних систем дозволяє:

- стандартизувати розрахунки і значно прискорити їхнє виконання на основі використання ЕОМ;

- визначити, залежно від логічної умови, імовірність безвідмовної роботи системи під час виконання польотного завдання, імовірність виникнення катастрофічної, аварійної чи складної ситуації у польоті;

- оцінити вплив надійності кожного елемента та надійність усієї системи тощо.

Для великих систем АТ цей метод не завжди можна реалізувати, через велику кількість станів системи, а також низку специфічних властивостей, що характеризують складний процес експлуатації АТ, а саме:

- змінний режим експлуатації;

- різну періодичність й глибину контролю станів елементів системи;

- неповну вірогідність контролю;
- різну дисципліну ТО і відновлення.

5.5. Аналіз надійності відновлювальних систем АТ

Показники надійності АТ взаємозв'язані з системою технічної експлуатації (СТЕ). Зміна параметрів одного об'єкта призводить до зміни параметрів СТЕ, що, у свою чергу, змінює показники надійності АТ. Це значно ускладнює задачу оптимізації надійності об'єктів експлуатації при централізованій системі технічної експлуатації, особливо для територіально розосереджених об'єктів, у яких навіть при спільній структурі й виконуваних функціях показники надійності можуть істотно відрізнятись.

Використання системи технічної експлуатації гостро ставить питання, з одного боку, про інваріантність параметрів надійності об'єктів, що обслуговуються, з іншого - про забезпечення стійкості СТЕ до зміни характеристик зовнішнього середовища, у першу чергу, до зміни характеристик об'єктів, що обслуговуються.

У зв'язку з цим при аналізі складних технічних систем АТ необхідно враховувати три групи факторів:

- структуру системи і логіку функціонування її елементів;
- специфіку процесу експлуатації системи;
- особливості оперативного й обслуговуючого персоналу.

Процес експлуатації у загальному випадку можна розділити на окремі фази: експлуатацію, контроль стану системи, її технічне обслуговування, очікування ТО, ремонт тощо.

У процесі експлуатації система може змінювати свій стан, переходячи від однієї фази до іншої.

Можливість вирішення системою поставлених задач та якість їхнього вирішення залежать від стану системи і тієї фази процесу експлуатації, в якій вона знаходиться. Так, якщо потоки відмов і відновлювань технічних пристроїв найпростіші, а, отже, розподіл проміжків часу між відмовами і моментами завершення відновлення експоненційний, то це дозволяє застосувати для побудови моделей надійності технічних пристроїв апарат марківських випадкових процесів.

Якщо процес, що відбувається у фізичній системі зі зліченою множиною станів і безперервним часом, є марківським, то можна

описати цей процес за допомогою звичайних диференціальних рівнянь, невідомими у яких є імовірнісні стани $R_i(t)$.

Для побудови моделі необхідно:

- визначити кількість станів n , у яких знаходиться система в період експлуатації;

- скласти діаграму станів та переходів, що відображає множину можливих станів об'єкта та імовірних однокрокових переходів між ними;

- вказати початковий стан системи;

- визначити для кожного можливого переходу інтенсивності a_{ij} потоку, що переводять систему з S_i до S_j стану.

Імовірність R_i перебування системи у будь-якому із станів S_i описують системою диференціальних рівнянь, які перетворюються в стаціонарному режимі експлуатації на алгебраїчні:

$$\sum_{j=1}^n a_{ji} R_j - \sum_{i=1}^n a_{ij} R_i = 0.$$

Підставляючи a_{ij} , залежно від системи ТО, визначають R_i відповідно до різних поєднань параметрів ТО.

Для складання системи диференціальних рівнянь, що описують процес експлуатації технічного пристрою, використовується таке мнемонічне правило: похідна $\frac{dR_i(t)}{dt}$ містить в собі кількість

членів, рівну кількості стрілок i -го стану; кожний член, у свою чергу, дорівнює добутку імовірності того стану, із якого спрямована стрілка на параметр потоку, який переводить систему за даною стрілкою; при цьому, якщо стрілка спрямована на i -й стан, то член беруть зі знаком "+", а якщо від i -го стану, то зі знаком "-". Так, система рівнянь, що визначають імовірність станів системи, наведеної на рис.5.13, має вигляд:

$$\begin{aligned} 0 &= \lambda_1 R(S_0) + \mu_1 R(S_1); \\ 0 &= \lambda_1 R(S_0) - (\lambda_2 + \mu_1) R(S_1) + \mu_2 R(S_2); \\ 0 &= \lambda_2 R(S_1) + \mu_2 R(S_2), \end{aligned}$$

де λ_i - інтенсивність відмов;
 μ - інтенсивність відновлень;
 S_i - стани системи.

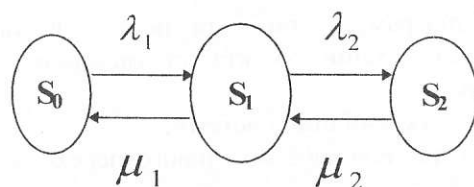


Рис.5.13. Граф стану системи

Імовірності станів системи визначають за формулами:

$$R(S_0) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2}}; \quad R(S_1) = R(S_0) \frac{\lambda_2}{\mu_2}; \quad R(S_2) = R(S_0) \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\mu_2 \mu_1}.$$

Імовірність відмови системи дорівнює

$$Q_{від} = R(S_1) + R(S_2).$$

Однак, при аналізі надійності складних технічних систем АТ не завжди вдається коректно використати марківські процеси. Зазвичай, це стосується часу відновлення чи потоку відмов, що не є найпростішим. Побудова системи рівнянь, що описує немарківські процеси, пов'язана з великими математичними труднощами.

Ефективним методом вирішення задач аналізу характеристик функціонування складних технічних систем у цьому випадку є імітаційне моделювання й використання ЕОМ.

Важливу роль для здійснення імітаційного моделювання відіграють зручність опису та простота математичного апарату, можливість програмної реалізації моделюючих алгоритмів.

Загальна послідовність дій при розв'язанні задач моделювання систем АТ складається з етапів:

- формулювання цілей дослідження;

- аналізу проблеми і постановки задачі;
- побудови повної моделі системи як логічної схеми;
- формалізації (опису) моделі;
- оцінки складності й точності моделі;
- спрощення моделі з точки зору її реалізації;
- вибору методів і засобів моделювання;
- моделювання і обробки результатів, ідентифікації системи;
- застосування результатів для поліпшення досліджуваної системи чи прогнозування її станів.

На основі одержаних результатів можна розширити уявлення про систему і, отже, уточнити наявну модель, поставити інші цілі, повторити знов процедуру моделювання, отримати нові результати тощо.

Проводячи оцінку надійності систем "людина-машина" (СЛМ) аналітичними методами або методами імітаційного моделювання, необхідно використовувати: інженерно-психологічні методики, алгоритми і програми для ЕОМ; дані про надійність технічних засобів СЛМ, а також відповідні дані про надійність дій персоналу.

До методів оцінки надійності СЛМ, крім загальних вимог, висувають низку спеціальних:

- врахування реальної структури системи, взаємодії підсистем і режимів роботи;
- спільний вплив різних типів відмов техніки та помилок людини-оператора;
- вплив умов експлуатації, дій обслуговуючого персоналу та врахування функціонального значення системи;
- можливість коригування і розвитку методів оцінки;
- можливість розробки різноманітних заходів щодо підвищення надійності;
- оцінку виробничих та експлуатаційних витрат з метою відшукання можливості їхнього зменшення;
- використання для розрахунків мінімальних обсягів вихідного статистичного матеріалу, а також відповідної інформації, отриманої для відомих методів.

Таким чином, для відновлюваних систем АТ оцінку надійності слід проводити на основі даних про фактори, які визначають їхні надійнісні властивості й характеристики. До таких

даних відносяться: перелік елементів системи та їхній взаємозв'язок щодо забезпечення станів працездатності системи з кожної із виконуваних нею функцій (надійнісна структура системи); відомості про надійнісні властивості, характеристики і показники надійності елементів систем; (тип або типи відмов з кожного елемента, закони розподілу часу безвідмовної роботи і часу відновлювання, числові показники надійності); відомості про інші фактори, що впливають на результуючу надійність функціонування системи (режим експлуатації системи, несприятливі умови експлуатації, дисципліна й параметри технічного обслуговування і відновлення, склад та обсяг запасних частин і порядок їхнього поповнення, засоби технічної діагностики та їхнє використання тощо).

Запитання для самоперевірки

1. Наведіть види резервування, вкажіть режими роботи резервних елементів.
2. Як розраховується надійність систем при послідовному та паралельному з'єднанні елементів?
3. Вкажіть методи розрахунку надійності складних систем, їхні переваги та недоліки.
4. Проаналізуйте переваги та недоліки схемних методів підвищення надійності АТ.

6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

6.1. Етапи формування надійності авіаційної техніки

Формування надійності виробів АТ є складним процесом, залежним від багатьох технічних та організаційних факторів, охоплюючим етапи проектування, виробництва та експлуатації. Різні етапи життєвого циклу виробів АТ не можна розглядати окремо: вони взаємопов'язані і складають елементи єдиної системи керування надійністю ПС та АД.

Так, аналіз надійності виробів за умов експлуатації є необхідною ланкою оцінки якості виробів, важливою складовою частиною проведення робіт щодо подальшого їхнього удосконалення та основою розробки нових конструкцій АТ.

Забезпечення надійності АТ здійснюється внаслідок підвищення втомлісної міцності, термостійкості, зносостійкості, віброміцності елементів конструкції, раціонального вибору схем функціональних систем, удосконалення технології виготовлення і організації ТО, розробки і застосування ефективних засобів і методів діагностування технічного стану об'єктів експлуатації та ряду інших факторів, спільна дія яких визначає експлуатаційну надійність АТ.

Надійність технічних засобів значною мірою залежить від технології їхнього виробництва. Тому необхідно розглядати технологічні процеси виготовлення конкретного виробу як елементи єдиної процедури наскрізного проектування. При цьому проектування виробу повинно здійснюватись з орієнтацією не на абстрактний, а на конкретний технологічний процес, на конкретні виробничі умови і потужності.

При розгляді проблем забезпечення надійності ПС необхідно передбачати оптимальні розподіли витрат на проектування, виробництво та експлуатацію АТ з метою досягнення максимального народногосподарчого ефекту. Зростання витрат на проектування та виробництво виробів АТ зумовлює зменшення експлуатаційних витрат на ТОіР за рахунок збільшення періодичності ТО та ресурсу виробів, зменшення кількості запасних частин тощо. Крім того, підвищення надійності виробів на етапах проектування сприяє зростанню безпеки і регулярності польотів, а також ефективності використання АТ. Якщо обрати вартість виготовлення одного ПС за одиницю, то витрати на проектування, на сьогодні будуть складати 100-120 таких одиниць, а на експлуатацію - 15-18. При цьому частка витрат на ТОіР у загальних експлуатаційних витратах складатиме 28-32%, тобто приблизно п'ять вартостей нового ПС.

У всій множині проблем забезпечення надійності АТ, охоплюючих етапи проектування, виробництва та експлуатації (табл.6.1), особливу роль відіграють сучасні методи теорії надійності. Вони дозволяють отримувати об'єктивну кількісну

інформацію про рівень надійності технічних виробів, що розробляються і використовуються, на всіх етапах життєвого циклу. Ускладнення технічних систем, неминуче збільшення термінів їхнього проектування, конструювання та виробництва залучення величезних матеріальних та людських ресурсів до їхнього створення та експлуатації веде до постійного зростання ролі розрахункових методів теорії надійності.

Виникає ряд задач дослідження ефективності витрачання ресурсів на стадіях життєвого циклу виробів АТ. Ці задачі звичайно формують як задачі оптимального планування програм забезпечення надійності на різних етапах об'єктів експлуатації.

Аналіз типових задач дослідження надійності АТ та особливостей прийняття рішень на головних етапах життєвого циклу дозволяє побудувати логічну схему формування надійності АТ, яка містить в собі ряд моделей.

Модель виготовлення та контролю якості дослідних (серійних) зразків встановлює відповідність між рівнем безвідмовності виробів АТ, призначених для випробувань, та рівнем витрат на виготовлення й контроль якості.

Модель експериментальної обробки встановлює відповідність між рівнем відпрацювання конструкторської документації та рівнем витрат на експериментальну обробку.

Модель експлуатації й ТО встановлює відповідність між рівнем надійності серійних виробів АТ в процесі експлуатації та рівнем витрат на експлуатацію, обслуговування і ремонт ПС.

Модель функціонування виробу встановлює відповідність між рівнем надійності у процесі застосування та рівнем витрат ресурсів на практиці, заходи і засоби підвищення надійності.

Модель застосування системи встановлює відповідність між рівнем ефективності функціонування системи і витратами у процесі її функціонування.

Математичні моделі, які потрібні для проведення розрахункових робіт, повинні якомога повніше відображати сутність реальних об'єктів. Але слід звернути увагу на те, що наближення моделі до реальності має розумні межі, оскільки вихідні дані недостатньо достовірні.

Таблиця 6.1

Головні напрями забезпечення надійності АТ		
Етап проектування	Етап виробництва	Етап експлуатації
Встановлення обґрунтованих вимог щодо надійності виробів АТ	Забезпечення своєчасності та повноти підготовки виробництва нових виробів АТ	Підвищення рівня спеціальної підготовки ІТС
Оптимальний розподіл вимог щодо надійності між елементами системи	Вибір оптимальних режимів технологічних процесів	Підвищення якості технічної документації
Вибір оптимальних режимів роботи виробів АТ	Удосконалення виробництва	Удосконалення планування та керування постачанням запасних частин
Вибір обґрунтованих допусків щодо зміни параметрів виробів	Механізація та автоматизація виробничих процесів	Удосконалення організації ТО АТ
Захист виробів від впливу зовнішнього середовища	Розробка та впровадження комплексних систем керування виробництвом	Оптимізація стратегій та методів ТОіР АТ
Забезпечення високої ремонтотпридатності АТ	Оптимізація методів і режимів контролю якості продукції	Оптимальне планування виступу парку ПС
Розробка нових конструктивних рішень	Тренування й припрацювання виробів АТ	Впровадження засобів механізації та автоматизації процесів ТОіР

Етап проектування	Етап виробництва	Етап експлуатації
Оптимальне резервування виробів і систем АТ	Метрологічне забезпечення виробничих процесів	Впровадження ефективних засобів та методів діагностування і контролю технічного стану виробів АТ
Розробка ефективних систем контролю та діагностування виробів АТ	Забезпечення ритмічної роботи ділянок, цехів та відділів	Керування якістю ТО АТ
Стандартизація та уніфікація виробів	Керування якістю продукції	Оптимізація режимів ТО АТ
Застосування нових матеріалів	Розробка та впровадження стандартів підприємства	Удосконалення методів пошуку відмов і несправностей виробів АТ
Розробка конструктивних рішень, що виключають можливість помилок обслуговуючого персоналу при ТО ПС	Поліпшення умов та забезпечення охорони праці Контроль якості вихідних матеріалів	Керування надійністю виробів АТ Впровадження автоматизованих систем управління процесами технічної експлуатації АТ Впровадження автоматизованих систем інформаційного забезпечення

Аналіз головних принципів проектування технічних пристроїв та досвіду їх експлуатації дозволяє встановити певні логічні правила конструювання виробів АТ, які втілюються у раціональному поєднанні певних характеристик і експлуатаційних властивостей виробів, що дозволяє найефективніше використовувати їх в експлуатації.

Застосування цих правил та їх формалізація дозволяють встановити раціональний порядок проектування технічних пристроїв або проведення доробок на основі аналізу досягнутих значень визначальних характеристик та визначення вимог до інших експлуатаційних факторів даного виробу, що забезпечують оптимальне (або близьке до оптимального) їхнє поєднання.

Такий підхід щодо прийняття відповідальних рішень дозволяє поєднати оптимізацію з прогнозуванням, при цьому безпосередньо прогнозуються не параметри моделі, а вхідні дані до математичної моделі, яка служить для визначення оптимального поєднання властивостей об'єкта експлуатації. Поєднання безпосередньо прогнозування з оптимізацією дозволяє активно й ефективно керувати якістю виробів АТ відповідно до прийнятої цільової функції замість пасивного спостереження за її змінами в минулому.

6.2. Конструктивно-технологічні аспекти забезпечення надійності авіаційної техніки

Науково-технічний прогрес обумовлює не тільки зміну техніки й технології, але й здійснює вплив на всю систему організації та керування процесами проектування АТ.

Автоматизована форма організації проектування докорінно змінила характер праці проектувальників і конструкторів. З'являється якісно нова, незрівнянно продуктивніша технологія проектування технічних пристроїв за умов функціонування САПР.

При автоматизованому проектуванні виникає можливість математично моделювати поведінку об'єктів (проектних рішень) у зовнішньому середовищі, не звертаючись до експериментів на реальних об'єктах чи їхніх фізичних моделях, здійснити оптимізацію і, нарешті, обгрунтовано вибрати кращий варіант проекту технічного пристрою або його складової частини.

Реалізація вказаних особливостей дозволяє істотно підвищити якість робочої конструкторської документації, що веде до зниження часу і витрат на її коригування, доведення та випробування дослідного зразка.

Серед важливих напрямів розвитку автоматизації конструкторсько-технологічного проектування слід відзначити такі проблеми: математичне моделювання конструктивних рішень окремих класів об'єктів проектування (конструктивна схема, деталізація конструкції); математичне моделювання технологічних рішень; розробка обчислювальних методів пошуку найкращих конструктивних і технологічних рішень; створення інформаційних баз даних; створення ефективних програмно-технічних комплексів та засобів, що забезпечують оперативну роботу проектувальника у САПР з урахуванням спадковості традиційного стиля роботи розробника, конструктора й технолога.

Основою комплексу робіт щодо забезпечення надійності об'єктів експлуатації, що розробляються, є результати аналізу експлуатаційної інформації про досягнутий рівень надійності виробів-прототипів, граничних характеристик їхнього функціонування, причин та ознак відмов, умов експлуатації виробів.

При визначенні вимог до експлуатації АТ спираються на досягнуті результати з проектування, виробництва та експлуатації АТ і враховують тенденції їхнього розвитку. При розподілі вимог до надійності елементів систем виходять з умов експлуатації, складності елементів, ступеня впливу їхніх відмов на працездатність систем, обмежень за масою та інших факторів. При цьому виділяють найважливіші умови роботи виробів, при яких повинно забезпечуватися безвідмовне виконання заданих функцій.

Для підвищення надійності широко використовують структурні методи, в тому числі елементну, схемну, функціональну та інформаційну надлишковість. Оптимальність прийнятих рішень обґрунтовують відповідними розрахунками, випробуваннями та спеціальними експериментами. Моделювання складних процесів функціонування систем на ЕОМ дозволяє імітувати відмови окремих елементів, визначати їхню функціональну значущість, аналізувати працездатність систем при різних поєднаннях

технічних станів елементів та перевіряти міру відповідності прийнятих рішень встановленим вимогам.

Важливим напрямом зменшення експлуатаційних витрат і підвищення надійності ПС є забезпечення виробів, що проектуються, високою ремонтпридатністю, ефективною системою контролю й діагностування АТ.

Забезпечення заданих вимог до довговічності виробів здійснюють за рахунок оптимального вибору режимів роботи комплектуючих елементів, захисту виробів від шкідливих впливів зовнішнього середовища, вибору матеріалів і обґрунтованих допусків на зміну параметрів виробу у процесі експлуатації.

Забезпечення довговічності механічних систем, відмови яких пов'язані зі зношенням, старінням та втомою елементів конструкцій, має ряд особливостей. При їхній конструктивній розробці особливу увагу приділяють :

- вибору принципової схеми роботи вузлів механічних систем з урахуванням зносостійкості, циклічної міцності, зовнішнього середовища;
- вибору поєднання матеріалів у парах тертя;
- розрахунку розмірів та обґрунтуванню конфігурації деталей з урахуванням локальної й загальної міцності;
- розробці заходів щодо зниження перевантажень;
- організації систем змащування, захисту від забруднюючого впливу середовища та перегріву.

Перед конструктором на стадії проектування АТ з урахуванням довговічності при втомі на засадах концепції припустимих пошкоджень постають чотири головні задачі: визначення спектра експлуатаційних навантажень, планування ресурсних випробувань, визначення характеристик витривалості та розрахунок параметрів поширення тріщин від втомленості. Аналіз спектра зовнішніх навантажень та програм випробувань елементів конструкції проводиться із широким застосуванням ЕОМ. Це дозволяє досягнути різноманітності комбінацій навантажень і різних умов експлуатації при складанні програм стендових випробувань. Необхідними умовами забезпечення відповідності конструкції літака до концепції припустимого пошкодження є: визначення аналітичними й експериментальними методами зон розташування експлуатаційних пошкоджень, типів, розмірів та

інтенсивності пошкоджень, а також оцінка їхньої контролепридатності. На підставі цієї інформації визначаються потрібна періодичність, чутливість контролю, залишкова міцність конструкцій, які є основою для формування програм ТО.

Під час вибору матеріалів для деталей виробів, покриттів, методів хіміко-термічної та інших типів обробки поверхневих шарів враховують не тільки їхні вихідні механічні й теплофізичні властивості, але й зміни цих властивостей при експлуатації виробів внаслідок фізико-хімічних процесів, що відбуваються в матеріалах, впливу підвищених температур та інших факторів. Залежно від місця застосування матеріалів висуваються відповідні вимоги до їхньої міцності, вагової ефективності, жаростійкості, теплопровідності, теплоємності, корозійної стійкості, термічної втоми, обробки сучасними технологічними методами. При цьому широко використовують нові сплави на основі титану, алюмінію, жароміцні сплави на основі нікелю й кобальту, зпечені матеріали на основі міді чи заліза, склопластики, пластмаси, композиційні матеріали.

Уповільнення процесів старіння чи локалізація їхнього впливу дозволяє ефективно збільшити довговічність виробів і систем, у зв'язку з чим на етапі проектування виробів АТ ретельно вивчають особливості старіння різних конструкцій і матеріалів, визначають динаміку процесів старіння та характеристик об'єктів експлуатації.

Одним з найважливіших факторів забезпечення надійності виробів АТ на етапі виробництва є суворе дотримання технології у процесі масового виробництва виробів та постійне її вдосконалення. Деталі, вузли чи вироби, виготовлені відповідно до вимог конструкторської документації, але за різними технологічними процесами, мають різні експлуатаційні властивості й показники надійності. Так, межа динамічної міцності лопатки турбіни сучасного ГТД, виготовленої за різними технологічними процесами, змінюється на 35 - 45%.

Експлуатаційні властивості деталей та вузлів виробів АТ істотно залежать від якості спряжених поверхонь, які визначаються геометричними (макровідхилення, хвилястість, шорсткість) та фізико-механічними (мікротвердість, залишкові напруги,

структура) характеристиками. Усі ці параметри залежать від технології обробки деталей та збирання виробу.

Зношення деталей машин характеризується руйнуванням контактної поверхневого шару, в якому внаслідок взаємодії поверхонь відбуваються фізико-хімічні, зміни від втоми.

Контактна взаємодія деталей визначає фактичну площину дотику, контактну жорсткість, величину локальних напруг, умови утворення масляних клинів, адгезію мастил і покриттів та інші показники, які впливають на працездатність машин і приладів. На контактну взаємодію істотно впливають мікрогеометричні та фізико-механічні характеристики поверхні.

У технології машинобудування є великі резерви поліпшення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин. Удосконалюються такі прогресивні методи, як поверхневе пластичне деформування, вібронакочування, електромеханічна, магнітоабразивна та інші види обробки. Широкі можливості та доцільність застосування цих методів сьогодні визначаються не тільки умовами забезпечення високої продуктивності, а й створенням поверхонь з оптимальною несучою здатністю.

Відновлення деталей здійснюють методами нанесення гальванічних покриттів, наплавки й зварювання; використовуються газотермічні методи нанесення покриттів (детонаційне, плазменне, газоплазменне напилювання).

Процес підвищення надійності виробів АТ є безперервним і відбувається протягом усього часу існування виробів певного типу. Забезпечення нормативних вимог до надійності виробів АТ не виключає доцільності робіт щодо її подальшого збільшення.

6.3. Забезпечення надійності авіаційної техніки і збереження придатності до польотів повітряних суден та авіаційних двигунів

6.3.1. Ефективність процесу технічної експлуатації ПС та авіадвигунів

Важливу роль у забезпеченні надійності та подальшому підвищенні рівня безпеки польотів відіграє інженерно-авіаційна служба. Сьогодні значного розвитку та практичного застосування

знайшли нові методи й засоби діагностування технічного стану ПС; удосконалюються методи й форми організації ТОiP; успішно діють у ряді експлуатаційних організацій діагностичні групи; проводяться роботи щодо створення автоматизованої системи управління процесами технічної експлуатації.

Ефективність використання АТ за призначенням в значній мірі залежить від якості й повноти проробки комплексу взаємозв'язаних заходів щодо організації процесів технічної експлуатації (ПТЕ), таких як планування ТО, керування запасами, розрахунок чисельності та організація роботи авіаційного персоналу та ряду інших експлуатаційних факторів. Система технічної експлуатації – це комплекс взаємопов'язаних організаційних структур і технічних заходів щодо забезпечення працездатності та високої ефективності складних систем АТ у процесі їх використання за призначенням.

У проблемі технічної експлуатації вирізняються два аспекти: організаційний та науково-технічний.

Організаційний аспект пов'язаний з розробкою чітких принципів та основних концепцій побудови структури системи технічної експлуатації АТ, створенням органів управління процесами ТО, виробничих потужностей, забезпеченням запасними частинами, поширеної номенклатури технічних засобів, здійсненням ремонту й відновлення відмовивших виробів; організацією курсів з підготовки й перепідготовки авіаційного персоналу тощо.

Науково-технічний аспект проблеми технічної експлуатації пов'язаний зі створенням теоретичних засад та інженерних методів управління процесами технічної експлуатації складних систем АТ. Він передбачає розробку головних наукових положень; побудову моделей різних структур системи технічної експлуатації, які дозволяють розрахувати параметри ПТЕ, її ефективність та оцінювати вплив системи технічної експлуатації на надійність і ефективність конкретних систем АТ.

Предметним змістом проблем технічної експлуатації є здійснення сукупності заходів щодо планування, організації й технології проведення робіт з ТО, розрахунку і планування оптимальних комплектів запасних частин, інструменту й приладдя, організації ремонту всіх типів, розрахунку необхідного складу й

чисельності ремонтного і експлуатаційного персоналу, збирання й обробки даних про фактичний рівень надійності елементів і систем АТ та інших організаційно-технічних задач, які відносяться до технічної експлуатації.

Науковий зміст задачі експлуатаційного забезпечення полягає у розробці математичних моделей, що формалізують процеси технічної експлуатації та встановлюють залежність характеристик цих процесів від керованих змінних. У вигляді таких керованих змінних використовуються періодичність та тривалість ТО, кількість та номенклатура відновлювальних та невідновлювальних запасних елементів, чисельність і спеціалізація авіаційного персоналу тощо.

При аналізі ПТЕ слід враховувати специфічні особливості АТ як об'єктів експлуатації. До таких особливостей відносяться: різномірність систем ПС за цільовим призначенням та виконуваними функціями; неоднорідність елементної бази й типів технічних засобів, яка ускладнює організацію та виконання різних видів ТОiP; необхідність залучення фахівців багатьох профілів до виконання відновлювальних робіт; необхідність адаптації до умов і структур технічної експлуатації, що склалися в галузі. До цього слід додати ще такі особливості, як територіальна розосередженість технічних баз, яку треба брати до уваги, обираючи принципи організаційної побудови системи технічної експлуатації.

Задача наукового аналізу взаємозв'язаних процесів технічної експлуатації починається з побудови формалізованих моделей.

Можливі різні підходи до побудови формалізованих моделей технічної експлуатації: аналітико-імовірнісний, статистичний, розмито-імовірнісний.

В основу побудови аналітико-імовірнісних моделей покладено ідеї й методи теорії масового обслуговування. У цих моделях головні параметри технічної експлуатації пов'язують функціональною залежністю із показниками надійності та обраним критерієм ефективності процесу експлуатації.

Статистичні моделі базуються на методі статистичного моделювання на ЕОМ процесів виникнення відмов та відновлювань з урахуванням експлуатаційних факторів (ТО, ЗiП, обслуговуючий персонал). У загальній постановці задача зводиться до обчислення на машині показників надійності системи як функції

вектора керованих змінних, у вигляді яких використані параметри надійності компонент і ТО. Критерій оптимізації - мінімальна вартість експлуатації при заданих вимогах до показника надійності. Задача знаходження оптимуму полягає в побудові моделі цільової функції та виборі методу оптимізації з урахуванням обмежень. Вона може бути вирішена комбінованим імовірнісним методом, який є поєднанням методу статистичного моделювання з одним із методів теорії планування експериментів стосовно статистичного експерименту, що значно скорочує кількість звертань до моделюючого алгоритму.

Багато прикладних задач оцінки й забезпечення надійності складних систем доводиться вирішувати за умов неповноти, невирішеності й невизначеності вихідної інформації. За таких умов доцільно використовувати апарат теорії нечітких множин у розмито-імовірнісній трактовці. Загальна ідея підходу полягає в тому, щоб виразити деяку характеристику надійності через розмиту функцію, спираючись на апріорну нечітку інформацію. Фактори, які впливають на надійність системи, розбиваються на дві групи: дестабілізуючі фактори, що погіршують надійність, та фактори, що сприяють надійності.

До першої групи належать несприятливі фактори зовнішнього середовища: температура, волога, вібрації тощо.

До другої групи відносять ТО, наявність ЗІП, склад обслуговуючого персоналу, які характеризуються певним набором параметрів. Побудувавши функції належності "погіршуючих" та "поліпшуючих" параметрів, описують зміну стану системи як розмитий процес, що відбувається у фазовому просторі. Труднощі при вирішенні такого типу задач полягають у конструюванні функцій належності, яке звичайно виконують на основі експертних оцінок.

З ускладненням конструкції АТ, інтенсифікацією виробничих процесів, застосуванням нових засобів й методів діагностування і контролю стану виробів якість роботи ІТС все більше залежить від психологічних властивостей людини, особливо в тих видах виробничої діяльності, де помилка робітника (зумовлена нестійкістю уваги, невмінням швидко приймати вірні рішення) призводить до тяжких наслідків або великого економічного збитку.

Суб'єктивним факторам властива велика мінливість, зумовлена складом характеру, емоційністю та іншими якостями людини. Одним із засобів, який усуває негативний вплив суб'єктивних факторів, є механізація й автоматизація головних і допоміжних процесів.

Автоматизація процесів дозволяє досягнути підвищення продуктивності праці та більшої стабільності технологічних процесів, значно зменшити витрати на експлуатацію АТ.

Високий технічний рівень виробництва потребує й відповідного рівня його організації. При цьому зростає роль експлуатаційної інформації про стан виробничих процесів, що є основою для виробітку оперативних рішень, підвищує керованість виробничих процесів та забезпечує чіткість їхнього функціонування. Ефективність керівництва досягається не тільки за рахунок застосування прогресивних методів ТО, скорочення втрат робочого часу, зменшення помилок ІТС, а й внаслідок підвищення рівня організаційної та технічної культури авіапідприємств, удосконалення технології та організації виробництва.

Підвищення інтенсивності використання ПС при одночасному зниженні витрат на їхню експлуатацію передбачає застосування таких методів ТОiP, які забезпечують максимальне використання індивідуальних можливостей об'єктів експлуатації. Основою цих методів є проведення робіт залежно від стану виробів АТ.

Підтримання високого рівня надійності і безпеки польотів сучасних ПС, а також впровадження прогресивних методів ТОiP не можуть бути забезпечені без використання методів і засобів діагностування. Об'єктивна та своєчасна оцінка технічного стану та прийняття рішень щодо можливості подальшої експлуатації ПС чи його окремих вузлів і систем можливі лише за умов комплексного застосування різних методів діагностування та прогнозування. Ці методи засновані на аналізі зміни головних показників, що характеризують роботу систем і вузлів; інтенсивності виробітку довговічності найбільш навантажених конструктивних елементів; рівнів зовнішніх ознак, що виявляються у процесі функціонування виробів; результатів використання засобів неруйнуючого контролю.

Широке застосування в експлуатації АТ знайшли методи діагностування ГТД за результатами аналізу зміни вібраційних характеристик, зміною газодинамічних параметрів, аналізом накопичення продуктів зношення в мастилi. Для оцінки стану гiдравлічних й висотних систем, планера та шасі застосовують низку спеціальних діагностичних засобів.

Під час ТО АТ головну увагу слід приділити реалізації нових напрямів у технічній діагностиці АТ та методам неруйнуючого контролю; врахувати необхідність будівництва чи реконструкції відповідних ангарних комплексів.

Важливу роль в організації та проведенні ТО відіграє якість експлуатаційно-технологічної документації, при відпрацюванні якої необхідно враховувати умови виконання процесу ТО, підготовленості та досвід технічного персоналу.

Впровадження в експлуатацію нових типів АТ потребує від авіаційних підприємств вирішення складних технічних й економічних проблем. Докорінним чином має бути перебудована організація ТОiP, технологія та організація підготовки ПС до польоту.

Для прискорення НТП ключове значення має забезпечення сприятливих економічних та організаційних умов створення і впровадження нової техніки й технології. Принципове значення зараз має створення механізму реалізації науково-технічних новацій, що дозволяють докорінно підвищити ефективність та якість виробництва.

Якість системи технічної експлуатації ПС виявляється у процесі її функціонування, що складається з послідовних у часі змін станів експлуатації ПС: використання за призначенням (політ), різні види технічного обслуговування, ремонт, збереження, транспортування, очікування попадання в кожний із цих станів і т.ін. Керування процесом технічної експлуатації (ПТЕ) забезпечується сукупністю правил підтримки найвигідніших режимів роботи об'єктів та призначення робіт з ТОiP відповідно до прийнятої стратегії технічної експлуатації.

Ефективність ПТЕ є загальною характеристикою результатів функціонування системи технічної експлуатації ПС, відображає рівень безпеки польотів й ефективності використання авіаційної техніки і залежить від якості управління ПТЕ. Структура

ПТЕ ПС може бути задана сукупністю станів експлуатації, які різняться залежно від можливості використання ПС та їхніх потреб в ТОiP, а також можливих переходів між ними, які реалізуються при управлінні ПТЕ за конкретних умов експлуатації.

Рекомендується вирізнити такі групи станів експлуатації:

S_1 – група станів експлуатації, яка включає рейс, очікування рейсу, підготовку до рейсу, оперативне ТО за формою Б, усунення несправностей;

S_2 – група станів експлуатації, яка включає стани S_1 та стани періодичного ТО, простою з організаційних причин, усунення конструктивно-виробничих недоліків, простою через авіаційні пригоди, списання;

S_3 – група станів експлуатації, яка включає ремонт, очікування ремонту і т.ін.

Для оцінки ефективності ПТЕ використовують сукупність показників, які характеризують виконання основних вимог щодо забезпечення безпеки та регулярності польотів, ефективності використання та економічності експлуатації ПС. В табл. 6.2 наведені показники ефективності ПТЕ та процесів ТОiP як основних складових систем технічної експлуатації ПС.

Ефективність ПТЕ групи ПС, які знаходяться в стані S_1 , характеризує досконалість процесів використання ПС за призначенням та виробничою діяльністю оперативних цехів організацій ТОiP. Виробничу діяльність організацій ТОiP в цілому характеризує група S_2 .

Досконалість ПТЕ усього приписного парку ПС оцінюється за групою станів S_3 .

Система інформаційного забезпечення аналізу ефективності ПТЕ ПС складається з чотирьох потоків інформації про: відмови та несправності виробів АТ, затримки вильотів ПС, затримки ПС в різних станах, трудомісткість та вартість робіт з ТО в конкретних станах ПТЕ.

Статистичні дані результатів експлуатації конкретного типу ПС (відповідно до завдання) збирають за останні роки його експлуатації, користуючись інформацією обліково-звітної документації експлуатантів чи самостійних організацій ТОiP.

Крім цього, необхідно мати дані про сумарний наліт приписного парку ПС (W) та середню тривалість безпосадкового

польоту ($T_{\text{он}}$) даного типу ПС, а також значення міжремонтного ресурсу ($R_{\text{мр}}$) й періодичності ТО (Φ_k), які встановлені керівною нормативно-технічною документацією.

Розрахунок показників ефективності ПТЕ виконують окремо для кожної з відокремлених груп станів експлуатації (S_i ; $i = 1, 3$) в такій послідовності:

1. Визначають частоти попадання ПС в i -й стан

$$\pi_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i},$$

де N – кількість станів експлуатації у відокремленій групі.

2. Визначають середній час перебування ПС в i -у стані

$$\mu_i = \frac{t_i}{n_i}.$$

Середній наробіток ПС за рейс обчислюється за формулою

$$\mu_{\text{тп}} = \frac{W}{n_i},$$

де n_i – кількість рейсів.

3. Визначають середні працевитрати в i -у стані

$$\tau_{\text{ісп}} = \frac{\tau_i}{n_i}.$$

4. Визначають середні витрати коштів в i -у стані

$$C_{\text{ісп}} = \frac{C_i}{n_i}.$$

5. Визначають середню кількість відмов та несправностей, які були виявлені в i -у стані

$$d_{\text{ісп}} = \frac{\sum_{j=1}^K d_{ij}}{n_i},$$

де K – кількість відокремлених інших відмов та несправностей.

Доцільно класифікувати відмови (конструкційні, виробничі, експлуатаційні) та розрахувати відповідні значення $d_{\text{ісп}j}$, де індекс j вказує на означену причину відмови або несправності.

6. Визначають середню кількість затримок відправлень в i -у стані

$$m_{\text{ісп}} = \frac{\sum_{j=1}^l m_{ij}}{n_i},$$

де l – кількість означених причин затримок відправлень.

7. За формулами (табл.6.2) обчислюють показники ефективності ПТЕ ПС.

Аналіз рівня ефективності ПТЕ ПС виконують послідовно для кожної з відокремлених груп станів експлуатації (починаючи з S_1). Рівень ефективності ПТЕ ПС оцінюють відносним показником

$$\bar{q}_i = \frac{q_i}{q_{\text{іб}}},$$

де q_i – розрахункове значення показника ефективності;

$q_{\text{іб}}$ – базове значення показника ефективності, що визначається завданням на виконання розрахунку.

Якщо $\bar{q}_i < 1$, то маємо зниження рівня ефективності ПТЕ ПС за показником, що розглядається. Виключення складаються з показників K , $\tau_{\text{гв}}$ та $C_{\text{гв}}$, для яких значення, яке менше одиниці, відповідає підвищенню рівня ефективності ПТЕ ПС.

Аналіз зміни рівня ефективності ПТЕ ПС зводиться до вирішення таких взаємопов'язаних задач:

- виявлення факторів (причин), які зумовили ці зміни за кожним з станів експлуатації;

- оцінки ступеня впливу окремих станів експлуатації на показники ефективності ПТЕ;

- визначення можливих заходів, що направлені на підвищення рівня ефективності ПТЕ.

При аналізі зміни рівня ефективності ПТЕ насамперед звертають увагу на показники безпеки польотів та регулярності відправлень. Якщо має місце зниження рівня ефективності за цими показниками, то в першу чергу розробляють відповідні заходи в цьому напрямку.

При аналізі зміни рівня ефективності ПТЕ за показниками використання та економічної ефективності оцінка ступеня впливу окремих станів експлуатації на значення цих показників проводиться за:

- витратами часу – величиною $\pi_i \mu_i$;
- трудомісткістю – величиною $\pi_i \tau_i$;
- вартістю – величиною $\pi_i c_i$.

Стани, для яких вказані величини є найбільшими, розглядають як найбільш значущі щодо впливу на значення відповідних показників ефективності ПТЕ. Тому визначення можливих заходів щодо підвищення ефективності ПТЕ проводять послідовно по станах експлуатації відповідно до порядку зменшення вказаних величин.

Ефективність запропонованих заходів щодо підвищення рівня ефективності ПТЕ ПС оцінюють шляхом розрахунку відповідних показників з новими вихідними даними. При цьому як базові значення показників ефективності q_{i0} приймаються значення, які мали місце до впровадження запропонованих заходів.

Розглянуті результати не вичерпують усього різноманіття задач теорії надійності, які постійно розвиваються, але дозволяють вирішувати деякі важливі у практичному відношенні задачі забезпечення безпеки польотів, ефективності використання повітряного транспорту, оптимізації параметрів експлуатаційного забезпечення складних систем АТ.

Таблиця 6.2

Формули розрахунку показників ефективності ПТЕ ПС

Найменування показника	Розрахункова формула	Примітки
Наробіток на відмову	$T_n = \frac{\mu_{1n}}{d_{1n_{cp}}}$ $T_{nj} = \frac{\mu_{1n}}{d_{1n_{cpj}}}$	$d_{1Пср}$ – середня кількість відмов та несправностей, які були виявлені в стані П; $d_{1Псрj}$ – середня кількість відмов та несправностей, які були виявлені в стані П за j -ї причини
Коефіцієнт регулярності відправлень	$P_{TE(E)} = 1 - \frac{m_{icp(E)}}{n_1}$ $P_{TE(R)} = 1 - \frac{m_{icp(K)}}{\left(\frac{\mu_{1n}}{T_{0n}} - 1\right) n_1}$ $P_{TE} = 1 - \frac{m_{icp(E)} + m_{icp(K)}}{\mu_{1n}} T_{0n}$ $P_{j(E)} = 1 - \frac{m_{icpj(E)}}{n_1}$ $P_{j(R)} = 1 - \frac{m_{icpj(K)}}{\left(\frac{\mu_{1n}}{T_{0n}} - 1\right) n_1}$ $P_j = 1 - \frac{m_{icpj}}{\mu_{1n}} T_{0n}$	$m_{icp(E)}$, $m_{icp(K)}$ – відповідно кількість затримок відправлень в базовому та позабазовому аеропортах; $m_{icpj(E)}$, $m_{icpj(K)}$ – відповідно кількість затримок відправлень за j -ї причини в базовому та позабазовому аеропортах

Закінчення табл. 6.2

Найменування показника	Розрахункова формула	Примітки
Коефіцієнт використання	$K_u = \frac{\pi_1 \mu_n}{\sum_{i=1}^N \pi_i \mu_i}$	
Коефіцієнти можливого використання	$K_{Bu} = \frac{\pi_1 \mu_n + \sum_{j \in N_j} \pi_j \mu_j}{\sum_{i=1}^{1N} \pi_i \mu_i}$	N_j – множина станів групи S_j
Питомі простої на ТОіР	$K_{\Pi} = \frac{\sum_{K \in N_K} \pi_K \mu_K}{\pi_1 \mu_{1n}}$	N_K – множина станів ТОіР груп S_2, S_3
Питома трудомісткість ТОіР	$\tau_{y\theta_{TOiP}} = \frac{\sum_{K \in N_K} \pi_K \tau_{Kcp}}{\pi_1 \mu_{1n}}$	
Питома вартість ТОіР	$C_{y\theta_{TOiP}} = \frac{\sum_{K \in N_K} \pi_K C_{Kcp}}{\pi_1 \mu_{1n}}$	

6.3.2. Аналіз контролепридатності, вибір та обґрунтування діагностичних параметрів об'єктів експлуатації

Процес контролю й діагностування технічного стану АТ розглядають в рамках рішень проблеми удосконалення організації управління технічним станом і забезпечення ефективності використання авіаційної техніки. Він включає:

- розробку вимог до технологічних процесів ТО та методів діагностування;
- перевірку відповідності параметрів об'єкта контролю встановленим вимогам та прогнозування їхніх змін у процесі експлуатації;
- виявлення відхилень, які виникли, й здійснення пошуку елементів, що відмовили;

- оперативне усунення відхилень шляхом реалізації оптимальних заходів ТО.

Функції контролю та діагностування виробів АТ не повинні обмежуватися тільки контролем параметрів та їхнім аналізом. Також включаються й елементи управління процесом експлуатації АТ. Методи контролю, метою яких є тільки індикація стану виробу (придатний, не придатний), не має достатньої чутливості, подовжують технологічний процес, потребують додаткових витрат, а головне – не попереджають наслідків відмов.

Сьогодні особливу увагу треба приділити методам активного контролю, сутність яких - в аналізі динаміки зміни технічного стану об'єктів та його прогнозування.

При цьому методи контролю та діагностування АТ направлені на попередження усіляких втрат у процесі експлуатації, сприяють підвищенню стабільності технологічних процесів ТО та забезпечують безпеку польотів.

Однак можливість впровадження й ефективність системи контролю й діагностування визначаються властивостями виробів АТ як об'єкта контролю.

Забезпечення контролепридатності передбачає необхідність:

- апаратної пристосованості виробів АТ до діагностування у процесі експлуатації;
- взаємопогодження характеристик виробів, методів діагностування й характеристик засобів діагностування.

Контролепридатність виробів якісно характеризується її показниками (табл.6.3).

Роботи для забезпечення контролепридатності виробів АТ включають:

- 1) визначення задач й видів засобів існуючої системи контролю технічного стану.
- 2) оцінку рівня контролепридатності виробів АТ;
- 3) формування вимог до контролепридатності виробів АТ;
- 4) аналіз фізичних процесів, які протікають при функціонуванні об'єктів діагностування, з метою виявлення механізмів виникнення й ознак проявлення пошкоджень та дефектів;
- 5) вибір методу діагностування, розробку моделі об'єкта діагностування;

Таблиця 6.3

Показники контролепридатності та формули для їх розрахунку

Показник	Формула для розрахунку	Умовні позначення
Коефіцієнт повноти перевірки справності (працездатності, правильності функціонування)	$K_{пп} = \frac{\lambda_k}{\lambda_0}$	λ_k – сумарна інтенсивність відмов складових виробів, що перевіряються; λ_0 – сумарна інтенсивність відмов виробу
Середній час підготовки виробу до діагностування заданою кількістю спеціалістів	$T_e = T_y + T_{мо}$	T_y – середній час встановлення й зняття вимірювальних приладів, необхідних для діагностування; $T_{мо}$ – середній час монтажно-демонтажних робіт
Середня трудомісткість підготовки виробу до діагностування	$S_e = S_y + S_{мо}$	S_y – середня трудомісткість встановлення й зняття вимірювальних приладів; $S_{мо}$ – середня трудомісткість монтажно-демонтажних робіт на виробі
Коефіцієнт уніфікації пристроїв спряження	$K_{yc} = \frac{N_y}{N_0}$	N_y – кількість уніфікованих пристроїв спряження; N_0 – загальна кількість пристроїв спряження
Рівень контролепридатності при оцінці: - диференційній - комплексній	$q_i = \frac{K_i}{K_{i0}}$ $q = \prod_{i=1}^n (q_i)^{\sigma_i}$	K_i – значення показника контролепридатності виробу, що оцінюється; K_{i0} – значення базового показника контролепридатності; n – кількість показників контролепридатності; σ_i – коефіцієнт вагомості i -го показника

- 6) розробку схеми розміщення контрольних точок на виробу та їх конструктивне оформлення (роз'єми, лючки, штуцери і т. ін.);
7) оцінку досягнутого рівня контролепридатності.

До складу задач контролю рівня АТ входять:

- контроль працездатності;
- пошук місць відмов;
- контроль параметрів виробу АТ, які відображають дії екіпажу під час виконання польотного завдання;
- контроль параметрів виробу АТ у польоті та їхню наземну обробку для прогнозування його технічного стану і т. ін.

На основі статистичних даних результатів експлуатації АТ оцінюють показники контролепридатності й виявляють ознаки виявлення пошкоджень та дефектів виробів АТ.

Побудова математичної моделі об'єкта діагностування є основою для обрання методу діагностування й включає такі етапи:

- параметризацію об'єкта діагностування, тобто опис відокремлених елементів об'єкта та можливих параметрів для оцінки їх технічного стану;
- визначення залежностей між геометричними змінюваними елементами та контрольованими параметрами.

Після вибору методу діагностування й конструктивної розробки, яка забезпечує можливість його використання, оцінюють досягнутий рівень контролепридатності.

Діагностичні параметри обирають на основі результатів структурного аналізу систем, визначення основних причин відмов та несправностей заданої системи та імовірностей їх появи q_i , сукупності можливих перевірок технічного стану систем та оцінки ефективності використання параметрів контролю.

Основні причини відмов та значення імовірностей q_i визначають на основі результатів експлуатації заданої системи

$$q_i = \frac{r_i}{r},$$

де r_i – кількість відмов та несправностей системи за i -ю причиною за даний період часу;

r – загальна кількість відмов та несправностей заданої системи за даний період часу.

При недостатньому обсязі статистичних даних умовні імовірності q_i визначають експертним методом. Слід пам'ятати, що

$$\sum_{i=1}^m q_i = 1,0$$

де m – кількість причин відмов системи.

Сукупність можливих перевірок (методів контролю) технічного стану елементів заданої системи визначають на основі аналізу можливого використання неруйнуючих методів контролю, аналізу існуючої системи контролю та систем контролю найновіших типів ЛА. При цьому враховують пристосування системи до виміру параметрів контролю або можливості забезпечення контролю параметрів за рахунок конструктивних змін заданої системи ЛА.

Особливу увагу при виборі параметрів контролю приділяють параметрам, які кількісно оцінюються при вимірах в процесі експлуатації. Кількісна оцінка параметрів дозволяє прогнозувати працездатність індивідуальних об'єктів експлуатації. Як діагностичні параметри використовують штатні параметри, котрі вимірюються бортовою апаратурою, та параметри, які вимірюються спеціальними засобами контролю при ТО. Систематична реєстрація штатних функціональних параметрів, таких як тиск, температура, витрати робочої рідини або газу на заданих режимах та аналіз динаміки зміни результатів контролю в процесі експлуатації, дозволяє суттєво підвищити ефективність методів діагностування виробів.

Для оцінки станів фільтрів та виробів, технічний стан яких впливає на місцевий опір в системах, встановлюють датчики для виміру перепаду тиску на даних виробках. Для діагностування виробів при ТО використовують такі структурні параметри, як величина зазору, довжина та глибина тріщини, ступінь ерозії, величина зносу елементів системи тощо.

Результати спектрального аналізу масла дозволяють судити про стан елементів, які омиваються маслом, за кількістю продуктів зносу в маслі; віброакустичний контроль - за ступенем зносу

елементів підшипників, насосів; віброметрія - за елементами, котрі обертаються, і т. ін.

Ці методи контролю можна використовувати при проведенні періодичних видів ТО. Вони дозволяють діагностувати й прогнозувати технічний стан виробів. Для оперативної оцінки стану раціонально використовувати штатні засоби контролю.

Аналіз ефективності застосування методів контролю технічного стану систем та виробів ЛА може бути проведений на основі інформаційної оцінки процесу діагностики, який базується на аналізі таблиці станів (табл.6.4), в якій рядки відповідають усім можливим станам (можливі відмови та несправності заданої системи), а графи – всім можливим перевіркам (параметри контролю).

Процес контролю є процесом зниження невизначеності щодо оцінки об'єкта експлуатації, що вивчається. Для оцінки ефективності контролю визначають величину приросту інформації про об'єкт. Якщо складна система може знаходитися з імовірністю q в одному з можливих несправних станів, то мірою невизначеності стану системи буде ентропія H_o

$$H_o = - \sum_{i=1}^m q_i \log_2 q_i,$$

де m – кількість можливих несправних станів системи (кількість можливих причин відмов та несправностей системи);

q_i – імовірність появи відмов за i -ю причиною (за умов наявності в системі відмови).

Кожна перевірка несе визначену інформацію про стан об'єкта

$$I_i = H_o - H_i,$$

де I_i – кількість інформації після;

H_o – апріорна невизначеність стану системи (ентропія системи до перевірки);

H_i – апостеріорна невизначеність стану системи (ентропія системи після проведення перевірки);

$$H_i = -\sum_{i=1}^l q_i \log_2 q_i,$$

де l – кількість причин відмов системи, не охоплених контролем даного параметра.

Кількість інформації після однієї перевірки визначається за формулою

$$I_i = -\sum_{i=1}^k q_i \log_2 q_i,$$

де k – кількість причин відмов системи, які виявлені даною перевіркою:

$$k + l = m.$$

З усієї множини можливих причин відмов кожний із контрольованих параметрів, які розглядаються, визначає технічний стан тільки деяких елементів. У зв'язку з цим ефективність методу контролю оцінюють відношенням

$$E_k = \frac{I_i}{H_o} = \frac{H_o - H_i}{H_o}.$$

На основі результатів аналізу відмов та несправностей заданої системи й сукупності можливих перевірок складають таблицю станів, в кожній графі якої ставлять 0, якщо параметр контролю реагує на появу даної відмови, або 1, якщо параметр контролю не реагує на появу даної відмови (табл.6.4, графі 2-7) та оцінюють ефективність кожного параметра контролю.

Як приклад в табл.6.4 наведені результати оцінки ефективності параметрів контролю паливної системи ГТД.

Ентропію станів паливної системи до контролю визначають на основі отриманих оцінок, в яких значення $q_i \log_2 q_i$ визначають з дод. 3.

Тоді

$$H_o = -\sum_{i=1}^{m=8} q_i \log_2 q_i = 2,9048.$$

Визначають кількість інформації, яку отримують в результаті перевірки кожного параметра контролю. Так, наприклад, при контролі тиску палива P_r кількість інформації дорівнює

$$J_{P_r} = -\sum_{i=1}^{K=5} q_i \log_2 q_i = 0,3971 + 0,3671 + 0,1950 = 0,950.$$

Розраховують ефективність параметра контролю за формулою

$$E_k = \frac{I_i}{H_o} = \frac{0,950}{2,9048} = 0,33.$$

При виборі сукупності діагностичних параметрів треба, щоб контроль забезпечував отримання найбільшого значення кількості інформації.

Аналіз даних табл.6.4 показує, що одночасне використання двох найбільш інформативних методів контролю – віброакустичного ($J = 1,62$) та візуального ($J = 1,58$) не забезпечує отримання максимального значення кількості інформації. Це зумовлено тим, що візуальний контроль в основному дублює можливість виявлення несправностей паливної системи, які забезпечуються віброакустичним методом, й додатково сприяє виявленню негерметичності трубопроводів системи ($-q_i \log_2 q_i = 0,3322$).

В той же самий час використання віброакустичного методу з контролем перепаду тиску Δp забезпечує максимальну кількість інформації, тому що контроль Δp додатково до віброакустичного методу оцінює стан паливних фільтрів ($-q_i \log_2 q_i = 0,4346$):

$$J_{\Sigma} = 1,62 + 0,4346 = 2,0546.$$

Таблиця 6.4

Таблиця станів паливної системи ГТД

Причина відмов та несправностей системи	Параметри контролю						q_i	$-q_i \log_2 q_i$
	тиск палива	газодинамічні	витрати палива	перепад тиску	віброакустичні	підтікання палива		
Порушення герметичності трубопроводів паливної системи	1	1	1	1	1	0	0,10	0,3322
Відмова насосів ЕЦН-14	1	1	1	1	0	0	0,18	0,4453
Відмова насосів 463	1	1	1	1	0	0	0,15	0,4105
Відмова БНК-10	0	1	0	1	0	0	0,14	0,3971
Розрегулювання НД, НД-24, АДГ-24	0	0	0	1	0	1	0,12	0,3671
Відмова агрегатів НД-24, АДГ-24	0	0	0	1	-	-	0,04	0,1858
Засмічення паливних фільтрів	1	1	1	0	1	1	0,17	0,4346
Інше	-	-	-	-	-	-	0,10	0,3322
Кількість інформації	0,950	0,5529	0,950	0,4346	1,620	1,5851	-	-
Ефективність контролю	0,33	0,19	0,33	0,15	0,56	0,54	-	-

Таким чином, з двох розглянутих сукупностей діагностичних параметрів найбільш раціональним є практичне здійснення контролю перепаду тиску палива Δp й використання віброакустичного методу.

6.3.3. Оптимізація алгоритмів пошуку несправностей функціональних систем ПС та АД

Послідовність проведення перевірок у процесі пошуку несправностей (ПН) функціональної системи (ФС) визначається алгоритмом ПН. Одним із головних напрямків удосконалення алгоритмів ПН є його оптимізація з використанням критерію оптимізації "мінімум середнього часу ПН".

Оптимізація алгоритму за критерієм "мінімум середнього часу пошуку несправностей" здійснюється у випадку, якщо послідовність проведення перевірок побудована за зростанням абсолютної величини показника

$$C_j = t_j / \bar{q}_j$$

де t_j – тривалість перевірки j -го елемента;

q_j – відносна імовірність відмови j -го функціонального елемента, яка обчислюється за формулою

$$q_j = K_{1000}^j / \sum_{j=1}^m K_{1000}^j,$$

де K_{1000}^j – показник безвідмовності j -го функціонального елемента (як показники безвідмовності функціонального елемента можуть бути використані):

λ – інтенсивність відмов;

ω – параметр потоку відмов;

m – кількість функціональних елементів (ФС).

Побудова оптимізованого алгоритму ПН виконується на основі спільного аналізу змістовного опису алгоритму та його логічної схеми.

Опис алгоритму ПН повинен відповідати таким вимогам:

- кожна елементарна перевірка повинна мати лише два результати: чи відповідає виріб, який перевіряється, нормам ТУ, чи не відповідає ("в ТУ" – "не в ТУ");

- результатом кожної елементарної перевірки, за виключенням останньої, повинно бути або визначення методу усунення несправності, або вказівка до проведення наступної елементарної перевірки;

- остання перевірка алгоритму ПН повинна мати властивість "кінцевого ефекту", тобто обидва її результати повинні вказувати на спосіб усунення несправності;

- усі перевірки мають бути елементарними, тобто опис перевіркової операції не повинен об'єднувати дві чи більше елементарних перевірок.

Після наведення опису алгоритму ПН будують логічну схему.

Логічна схема алгоритму ПН будується у формі двійкового дерева, в якому кожному позитивному результату елементарної перевірки ("в ТУ") ставиться відповідно знак "1", а кожному негативному результату ("не в ТУ") – знак "0". Елементарним перевіркам алгоритму відповідають умовні позначення у вигляді кілець, а методам усунення несправностей – у вигляді прямокутників. У кільцях та прямокутниках записані порядкові номери елементарних перевірок та методів усунення несправності. Поряд з умовними позначеннями перевірок та методів усунення несправностей записані їх вагові характеристики. Ваговою характеристикою перевірки є її тривалість, а методу усунення несправності – значення показника надійності функціонального елемента, який потребує заміни або відновлення технічного стану.

Побудова логічної схеми оптимізованого алгоритму ПН закінчується обчисленням середнього часу ПН за алгоритмом

$$T_{cp} = \sum_{j=1}^{m-1} t_j \cdot \sum q_j, \quad \text{де } q_j \in A_j,$$

де t_j – тривалість перевірки j -го елемента;

q_j – відносна імовірність відмови j -го елемента;

A_j – субмножина технічних станів функціональної системи.

Розглянемо побудову логічної схеми оптимізованого алгоритму та обчислення T_{cp} на прикладі відмови літака Іл-86.

"Літак відводить убік на пробігу та рулінні (рукоятка управління в нейтральному положенні)".

Для побудови оптимізованого алгоритму та логічної схеми ПН створимо таблицю рангів (табл.6.5), а на основі цієї таблиці – оптимізований алгоритм (рис.6.1) та його логічну схему (рис.6.2).

Таблиця 6.5

Таблиця рангів

Найменування функціональних елементів	Пневматики коліс	Гальмо	Педаль	Кінематика управління переднього ногою	Блок БУ-2А	Троси зворотного зв'язку
Найменування перевірок	Огляд пневматики	Огляд гальма	Перевірка відповідності механічного "0" педалей	Огляд кінематики управління переднього ногою	Перевірка в лабораторії блока БУ-2А	Перевірки натягу тросів зв'язку
Умовне позначення перевірки, №	П1	П2	П3	П4	П5	П6
t_j , хв.	5	3	6	4	25	15
K_{1000}	28,8	4,8	24	14,4	9,6	14,4
q_j	0,3	0,05	0,25	0,15	0,1	0,15
C_j	16,7	60	24	26,7	250	100
Ранг перевірки	1	4	2	3	6	5

Літак відводить убік на пробігу та рулінні (рукоятка управління в нейтральному положенні).

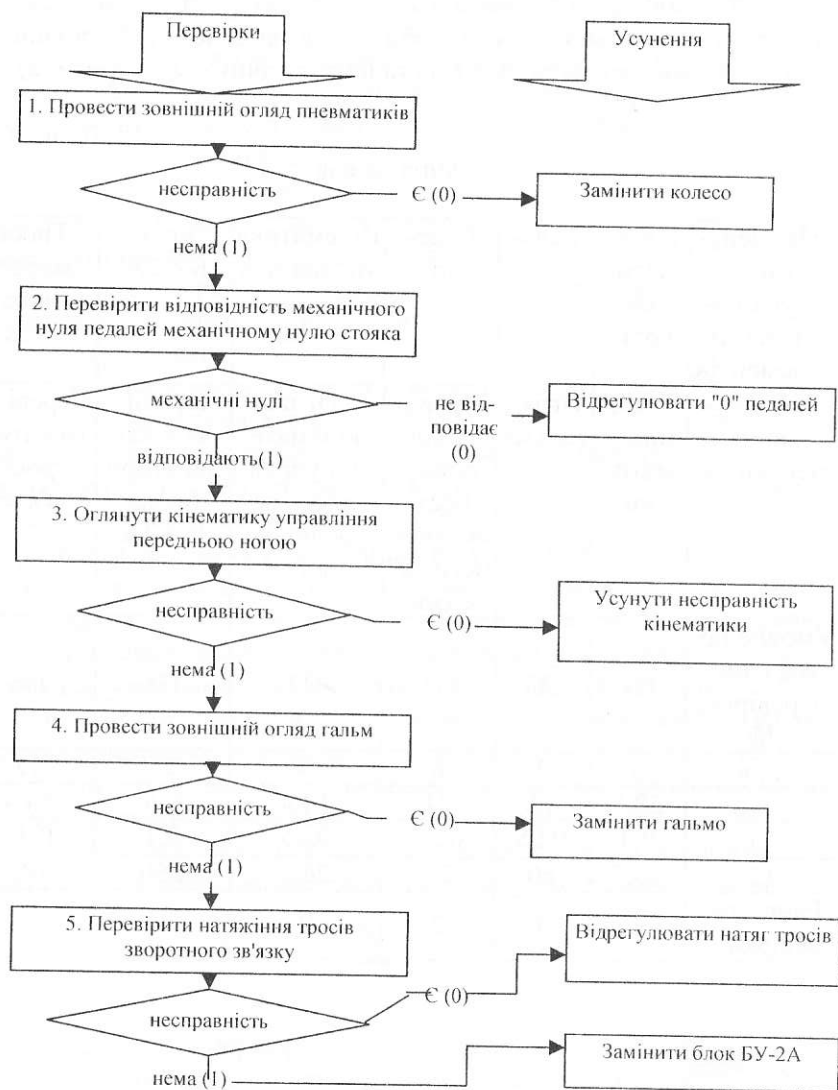
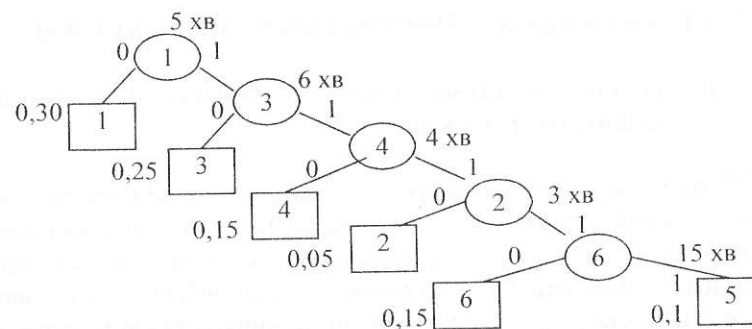


Рис.6.1. Змістовний опис оптимізованого алгоритму



$$T_{\text{ср}} = t_6 (q_5 + q_6) + t_2 (q_6 + q_5 + q_2) + t_4 (q_6 + q_5 + q_2 + q_4) + t_3 (q_6 + q_5 + q_2 + q_4 + q_3) + t_1 = 15 (0,15 + 0,1) + 3 (0,15 + 0,1 + 0,05) + 4(0,15 + 0,1 + 0,05 + 0,15) + 6 (0,15 + 0,1 + 0,05 + 0,15 + 0,25) + 5 = 15,6 \text{ (хв.)}$$

Рис.6.2. Логічна схема оптимізованого алгоритму

Запитання для самоперевірки

1. Вкажіть особливості та головні напрямки забезпечення надійності АТ на етапах проектування, виробництва і експлуатації.
2. Наведіть головні фактори, які визначають ефективність процесу технічної експлуатації ПС та АД.
3. Вкажіть основні показники контролепридатності виробів АТ та формули розрахунку.
4. Наведіть приклади застосування теорії надійності для вирішення задач експлуатації АТ.

7. КЕРУВАННЯ НАДІЙНІСТЮ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

7.1. Задачі та схема процесу керування надійністю авіаційної техніки

Підвищення ефективності організаційно-технічних рішень у процесі експлуатації АТ та постійне її вдосконалення розглядаються як керуюча динамічна система зі складною взаємодією організацій і підприємств, що забезпечують якість виробів АТ на етапах проектування, виробництва та експлуатації.

Керування надійністю - це цілеспрямована діяльність щодо обґрунтування, планування, забезпечення, підвищення та підтримки характеристик безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збережуваності об'єктів, що розглядаються.

В межах системи керування надійністю АТ на експлуатаційні організації ЦА покладається збирання, облік та обробка статистичних даних про виявлені у польоті і на землі відмови й пошкодження виробів АТ і на підставі аналізу їхніх причин, результатів експлуатації, оцінки фактичного рівня надійності АТ, а також результатів діагностування і контролю технічного стану виробів вирішення таких головних задач:

- вибір засобів і оптимізація режимів контролю та діагностування АТ з урахуванням конкретних умов експлуатації;
- розробка і реалізація організаційно-технічних заходів щодо попередження авіаційних подій і передумов для них внаслідок відмов виробів АТ, що виникли як з вини технічного персоналу та низької якості ремонту АТ, так і через недостатньо високу якість експлуатаційних властивостей виробів;
- реалізація оптимальних стратегій ТО виробів АТ;
- висування вимог до промислових підприємств і організацій з приводу усунення конструктивно-виробничих недоліків АТ;
- контроль відповідності фактичного рівня надійності виробів АТ заданим вимогам (за конкретних умов експлуатації);
- облік, виконання й оцінка ефективності заходів щодо підвищення надійності виробів АТ тощо.

Ефективне й оперативне підвищення надійності АТ забезпечується реалізацією керуючих впливів, створених на основі узагальнення інформації про фактичну надійність виробів АТ;

взаємозв'язком органів структури системи керування; організаційно-економічним механізмом пошуку і досягнення мети (рис.7.1).

Слід визначити, що вирішення перелічених завдань повинно здійснюватися комплексно стосовно усіх властивостей надійності з урахуванням економічних показників. Інтереси комплексного вирішення проблеми забезпечення надійності АТ, що охоплює етапи проектування і експлуатації, зумовлюють необхідність розробки єдиних методологічних принципів системного аналізу і керування як цілісного і самостійного наукового напрямку.

Сьогодні відбувається перехід від розрізнених та відокремлених досліджень певних питань до комплексного вивчення проблеми забезпечення надійності на засадах використання загальної теорії управління. Своє практичне втілення вказаний підхід знайшов у програмах забезпечення надійності АТ. Під програмою забезпечення надійності розуміється документ, який визначає комплекс організаційно-технічних заходів, вимог і правил, які необхідно виконати у процесі проектування, виробництва та експлуатації виробів АТ.

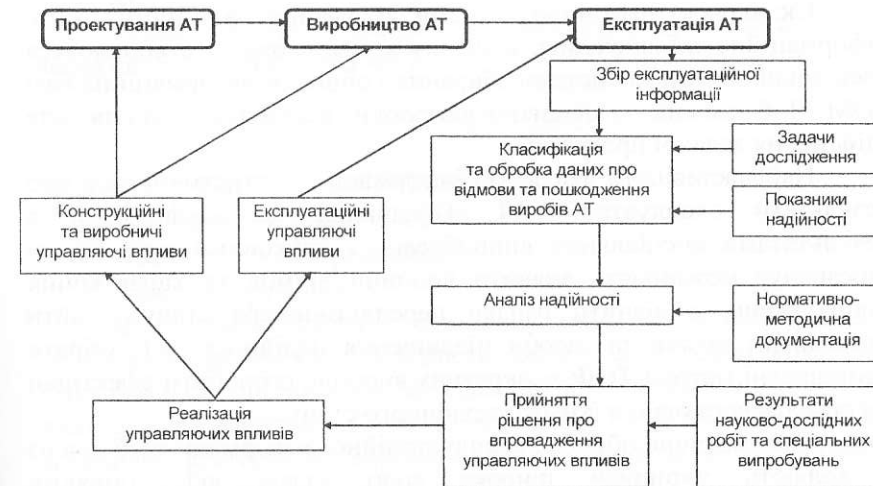


Рис.7.1. Схема системи керування надійністю АТ

Такий підхід дозволяє вирішувати задачі забезпечення надійності конкретних типів техніки з урахуванням усіх діючих факторів, адже неможливо забезпечити планомірного та стійкого підвищення надійності АТ і безпеки польотів окремими розрізненими заходами.

Розробка програми здійснюється як для проєктованої АТ, так і для АТ, що експлуатується, з метою підвищення ефективності її використання, обґрунтування нормативних рівнів надійності, оптимізації методів і режимів ТОіР, відпрацювання інших методичних і організаційних питань. Особливістю програм є те, що вони повинні відображати технічну політику на декілька років наперед, що обумовлює необхідність їхньої побудови на основі прогнозу розвитку науки й техніки.

Про особливу увагу щодо забезпечення надійності на провідних фірмах світу можна судити по витратах на реалізацію відповідних програм забезпечення надійності. Так, вартість **програм забезпечення надійності** складає у середньому до 20% від загальних витрат, спрямованих на розробку і випробування продукції. Причому, збільшення витрат на розробку різко зменшує витрати на експлуатацію готового виробу.

Складовою частиною системи керування надійністю АТ є інформаційне забезпечення, в зв'язку з чим сьогодні створюються спеціальні центри та системи збирання і обробки інформації на базі ЕОМ. Інформація є основою розробки керуючих впливів для здійснення заданої програми.

Найважливішим джерелом інформації є статистичні дані про результати експлуатації АТ. Поєднання цієї інформації з результатами спеціальних випробувань і науковими розробками забезпечує можливість виявити причини відмов та характерних пошкоджень, визначити ознаки передвідмовного стану, знайти оптимальні шляхи та засоби підвищення надійності АТ, обрати раціональні методи ТОіР конкретних виробів, розробити ефективні засоби діагностування їхнього технічного стану.

Математична обробка експлуатаційної інформації та її аналіз воляють вирішити широке коло задач, які сприяють підвищенню надійності АТ і забезпеченню безпеки польотів.

На основі встановлення зв'язків властивостей надійності з економічними показниками визначають закономірності керування

процесами формування якості виробів АТ та їхньої оптимальної реалізації за умов експлуатації, що дозволяє конструкторам та експлуатаційникам об'єктивно оцінити економічні результати зміни надійності виробів АТ, розкрити організаційно-технічний механізм пошуку нових рішень.

Під керуванням надійності АТ слід розуміти процес організації найкращого функціонування авіаційних систем, що зводиться до вибору раціональних шляхів (оптимальних рішень) досягнення поставлених цілей при наявній інформації.

Новим елементом при сучасному підході до забезпечення безвідмовності є **моделювання** можливих відмов та їхніх наслідків. Програми такого моделювання базуються на переліках можливих видів відмов компонентів. Ці переліки і є базою, на підставі якої будується робота щодо забезпечення і оцінки надійності сучасних виробів. При складанні програм моделювання враховують не тільки фізичну можливість відмов компонента, але й їх імовірність.

Побудова моделей складних систем з відновленням зумовлює необхідність посереднього етапу формалізації, яка розглядає процеси на основі загальних формально-теоретичних позицій і фіксує у знаковій формі головні властивості та зв'язки у складних системах.

Процес функціонування складної системи можна подати через еволюцію її стану в часі:

$$H = (S, P, W, V),$$

де S - вектор структурної будови системи;

P - вектор стану елементів системи;

W - вектор стану середовища;

V - вектор керування.

Формальна схема функціонування складних об'єктів експлуатації вказує на необхідність декомпозиції усього комплексу факторів, які впливають на ефективність функціонування АТ, аналізу умов експлуатації та проведення ТО з метою встановлення можливих альтернатив вирішення поставлених задач. Це визначає необхідність вирішення таких задач:

- розробка методів оцінки вартісних витрат на реалізацію кожної альтернативи, тобто побудова вартісних моделей процесу;

- розробка методів вирішення задач за умови високої невизначеності вихідної інформації;

- проведення розрахунків та їхній аналіз з метою вибору оптимальної альтернативи;

- розробка (визначення) умов реалізації оптимальної альтернативи в експлуатаційних підприємствах ЦА з урахуванням їхніх особливостей.

Крім того, формування оптимальних режимів ТОіР (як задача вибору оптимальної альтернативи забезпечення заданої безвідмовності функціональних систем АТ) потребує розробки, щонайменше, двох моделей: моделі функціонування виробів (на підставі якої формується оптимальний регламент ТОіР) і моделі процесу їхнього відновлення (на основі якої керують технологічними процесами ТО). Ці моделі повинні бути взаємопов'язані таким чином, щоб цільова функція моделі процесу відновлення була аргументом функції, що описує процес функціонування системи АТ.

При побудові вартісних моделей безпосередньо прогнозується лише ефект та обмеження як функції базових параметрів моделей стану виробів АТ. Необхідні витрати для досягнення цілі оцінюються конструкторами, оскільки ці витрати визначаються науково-технічним рівнем розробки, станом виробництва тощо. Використання моделей стану об'єктів експлуатації дозволяє вказати:

- зміну ефектів від експлуатації виробів при можливих змінах параметрів комплектуючих систем;

- можливу (доцільну) область зміни кожної складової властивості об'єкта експлуатації;

- граничні (доцільні) значення властивостей виробів;

- припустимість деяких обмежень при оптимізації тощо.

Для забезпечення необхідних характеристик надійності виробів за цих умов застосовується метод розрахунку "для найгіршого випадку". Водночас, у складних виробках відповідну комбінацію умов найчастіше однозначно визначити неможливо. Принципове обмеження методу проектування "для найгіршого випадку" полягає в тому, що цьому виходить із припущення про монотонність впливу кожного показника, що впливає на показники якості виробу. Перевірка такого припущення часто настільки ж

складна, як і саме проектування. Одним із рішень цієї проблеми є застосування методу статистичного проектування, суть якого полягає в тому, що до значень параметрів виробу, які моделюються в САПР, додаються випадкові флуктуації. Розмірність розв'язуваних при цьому задач, проте, зростає до такого рівня, що цей метод практично стає придатним тільки для дуже простих схем.

Велике поширення за останній час одержав **метод робасного** проектування, тобто нечутливого до збурень. Цей метод засновано на пошуку такої області, в якій дії, що збурюють, роблять мінімальний вплив на якість виробу.

Робастне проектування повинно забезпечити:

- скорочення кількості переробок до одержання прийнятного результату проектування;

- підвищення технологічності внаслідок урахування виробничих факторів;

- зниження рівня виробничого браку.

Обов'язковим елементом процесу проектування виробів є оцінка прогнозування їхньої надійності.

Подальші успіхи щодо вирішення проблеми забезпечення надійності АТ обумовлені такими факторами:

- розвитком і впровадженням методологічних та організаційно-технічних засад дослідження і забезпечення надійності АТ;

- удосконаленням методів дослідження і забезпечення надійності АТ на кожному етапі її створення, виробництва та експлуатації;

- розвитком і застосуванням автоматизованих систем проектування (САПР), гнучких виробничих систем (ГВС), систем інформаційного забезпечення (СІЗ), автоматизованих систем управління (АСУ), контролю, випробувань;

- навчанням широкого кола фахівців новим методам та засобам забезпечення надійності АТ тощо.

Як доводить передовий вітчизняний та зарубіжний досвід, найкращих результатів щодо створення високоефективних і надійних систем АТ за умов значної невизначеності, що супроводжує розробку, можливо досягнути лише шляхом розробки і послідовної реалізації цільових програм, які дозволяють забезпечити створення системи та гарантоване виконання завдань із

мінімальними сумарними витратами матеріальних, вартісних і часових ресурсів.

7.2. Інформація забезпечення надійності об'єктів експлуатації

Система керування надійністю АТ потребує створення інформаційної системи, яка б забезпечила можливість максимального використання усього потенціалу інформаційного фонду на усіх етапах експлуатації ПС та АД, а також автоматизації процесів інформаційного обміну на рівні експлуатуючих підрозділів, авіапідприємств, заводів, наукових організацій тощо. Інформаційна система повинна забезпечувати видання оперативної інформації про поточний технічний стан виробів, рівень надійності як окремих систем і об'єктів, так і сукупності її однотипних елементів. Система, реєструючи, накопичуючи та узагальнюючи масиви інформації про технічний стан АТ, повинна забезпечувати їхнє комплексне використання для оптимізації контрольованих параметрів, засобів контролю й діагностики, оцінки ефективності проведених доопрацювань виробів АТ, прогнозування технічного стану об'єктів експлуатації тощо.

Важливого значення при розробці інформаційної системи набуває врахування особливостей об'єктів експлуатації, склад і зміст необхідної інформації, які визначаються:

- завданнями системи управління;
- можливістю отримання певної інформації, її повнотою, вірогідністю, однорідністю та своєчасністю;
- моделями, що використовуються;
- вимогами до вихідної інформації, точністю вирішення задач;
- життєвим циклом виробу, на якому приймаються рішення тощо.

Однією з головних особливостей в реальній експлуатації є наявність неповної інформації, тобто прийняття рішень в усіх ланках управління відбувається за умов різної міри невизначеності, яка істотно впливає на якість рішень.

Принципова залежність керуючих впливів від вірогідності гіпотез відображає важливу властивість системи управління -

адаптацію як засіб подолання невизначеності. Ця властивість систем управління робить їх гнучким, чутливим інструментом управління будь-якою складною системою.

У процесі лабораторних, наземних і льотних випробувань дослідних зразків АТ ретельно фіксуються усі відмови й несправності, на основі яких уточнюються характеристики надійності, і відпрацьовується програма технічної експлуатації як для ПС у цілому, так і для кожного технічного пристрою, що входить до складу його конструкції.

При оцінці рівня надійності розроблених виробів, підготовці документації до серійного їх випуску і проведенні експлуатаційних випробувань аналіз та використання накопиченої інформації є невід'ємною складовою частиною загального комплексу робіт щодо забезпечення надійності нових виробів. Вивчення надійності серійних виробів за умов експлуатації є необхідною ланкою оцінки якості виробів, важливою складовою частиною проведення робіт щодо їхнього вдосконалення та основою для створення нових виробів АТ.

Таким чином, визначення розрахункових характеристик надійності відбувається на усіх етапах створення і використання технічних систем, а отримувана інформація про реальний стан їхньої надійності використовується для керування надійністю АТ.

Однією з головних задач науки є наукове супроводження розробок, випробувань і оволодіння новою технікою з метою забезпечення закладених у технічному завданні експлуатаційних показників надійності.

При цьому темпи розвитку авіаційних технічних баз, їхнє обладнання, удосконалення системи управління виробничими процесами, підвищення ефективності господарчого механізму, зростання культури виробництва повинні бути вищими за темпи створення нової АТ. У противному разі не буде отримано належного ефекту, і нова техніка не забезпечуватиме максимальної віддачі, якщо не зорієнтувати її експлуатацію на передову технологію авіатранспортного виробництва.

Розробка і впровадження методів ТОіР показує, що практична реалізація прогресивних методів, зокрема методів ТОіР "за станом", зумовлює різке збільшення обсягу інформації.

Джерелом такої інформації є статистичні дані про результати експлуатації і контроль станів АТ. Поєднання цієї інформації з результатами спеціальних випробувань та наукових розробок забезпечує можливість виявити причини відмов і пошкоджень, визначити ознаки передвідмовного стану, знайти оптимальні шляхи підвищення надійності виробів. Слід зазначити, що аналіз надійності серійних виробів і систем за умов експлуатації є найважливішою умовою їхнього конструктивного вдосконалення і засадою для розробки нових виробів АТ.

Вирішення задачі комплексної оцінки технічного стану виробів з урахуванням всіх можливих методів контролю працездатності окремих конструктивних елементів, вузлів, систем і двигунів у цілому потребує розробки великої кількості досить складних алгоритмів, які можуть бути реалізовані виключно на ЕОМ.

Високі економічні показники досягаються при організації ТО ПС на засадах застосування автоматизованих вбудованих систем діагностування АТ і пошуку несправностей, що сприяє скороченню обсягу й вартості ТО і одночасно збільшенню безпеки польотів.

Бортова апаратура реєстрації польотної інформації отримала значне поширення завдяки тому, що вона:

- здійснює безперервний контроль за станом об'єктів експлуатації;
- здійснює прогнозування технічного стану;
- відстежує короточасні та повторювальні відмови;
- сприяє скороченню кількості відмов у польоті та зменшенню трудомісткості й вартості ТО;
- оптимізує фонд запасних частин.

Велика увага приділяється створенню та застосуванню змішаних або наземно-бортових систем автоматизованого контролю технічного стану АТ. У цих системах реєстрація та попередня обробка польотних даних здійснюються на борту, а основна обробка інформації - на землі, з використанням потужних стаціонарних ЕОМ. Це дозволяє при реалізації програми контролю застосувати складніші алгоритми обробки даних і, отже, підвищити достовірність діагностування АТ.

Функції контролю й діагностування технічного стану виробів АТ - численні, різноманітні, трудомісткі. Сьогодні вони не

обмежуються тільки контролем параметрів виробів та їхнім аналізом, а повинні включати й елементи керування процесом експлуатації АТ, видачу коригуючих впливів, передбачати систематизацію інформації та її агрегування для передачі на вищі ієрархічні рівні.

Ефективне впровадження нової авіаційної та наземної техніки неможливо без широкої автоматизації керуючих й технологічних процесів.

Головними завданнями інформаційних систем, що виникають при управлінні виробничими процесами, є визначення

- організаційної структури бази та характеристик її діяльності;
- аналізу функціональних задач, виконуваних кожним підрозділом;
- інформаційної структури підприємства і інформаційних масивів;
- аналізу змісту і кількісних характеристик вхідної й вихідної інформації;
- методів обробки, аналізу й контролю інформації;
- необхідної та достатньої для керівництва інформації;
- аналізу документообігу на підприємстві;
- специфіки авіапідприємства з точки зору інформаційного забезпечення тощо.

Створення АСУ необхідно пов'язувати з глибокими перетвореннями у структурі та організації системи управління підприємства - саме це найголовніше при створенні АСУ.

Автоматизована система управління повинна ґрунтуватися на інтегрованій системі обробки даних. Локальні розробки АСУ для окремих процесів та виробництв малоефективні. Інтегрована обробка даних повинна широко використовувати уніфіковані модулі, зокрема матричні. Матричні розрахунки є надзвичайно зручними для використання в обчислювальних системах. Матриці також дозволяють здійснити правильну і просту постановку задач планування і управління та забезпечити зв'язок підрозділів системи управління щодо інтегрованої системи обробки даних. Інтегрована система обробки даних встановлює стандарт на всі процеси управління, формування документів і документообігу, постановку

задач, їхнє вирішення та видачу інформації з обчислювального центру.

Загальні принципи ефективності управління виробництвом мають бути розглянуті в комплексі методик оцінки ефективності заходів.

7.3. Сучасні принципи забезпечення льотної придатності повітряних суден та авіадвигунів

Забезпечення надійності складних систем - це комплексна проблема, що охоплює широке коло наукових (фізичних, хімічних, математичних, біологічних), інженерних (проектно-конструкторських, виробничо-технологічних, експлуатаційних) і економічних аспектів. Рішення цієї проблеми пов'язано з реалізацією численних організаційних, технічних і наукових досліджень, що потребують великих витрат часу і засобів, а також залучення різноманітних галузей науки, техніки і народного господарства.

Методи, що діяли до недавнього часу, і засоби забезпечення та контролю надійності, у тому числі регламентовані стандартами, вичерпали себе, тому що на практиці не забезпечують необхідної надійності апаратури за умов експлуатації. У зв'язку з цим останнім часом провідними фахівцями світу були сформульовані й реалізуються нові підходи щодо її забезпечення. Вони засновані на результатах досліджень фізики відмов і принципово нової ідеології забезпечення безвідмовності. Нова ідеологія містить у собі, насамперед, принципові зміни вимог до розробників і виробників щодо забезпечення якості та надійності, в основі яких лежить надійнісно-орієнтоване керування процесами проектування, виробництва та експлуатації.

Таблиця 7.1

Порівняння старих і сучасних принципів забезпечення надійності виробів АТ

Старі принципи забезпечення надійності	Сучасні принципи забезпечення надійності
<p>Прогнозування надійності ґрунтується на даних з експлуатації та певних статистичних значеннях інтенсивності відмов</p> <p>При прискорених випробуваннях на надійність застосовують прискорюючі чинники, однакові для всіх компонентів</p>	<p>Прогнозування надійності здійснюється на основі даних про фізику відмов у конкретному приладі і перевірки реальних умов функціонування компонентів у складі об'єкта (системи) та коригується за результатами діагностування під час експлуатації.</p> <p>При прискорених випробуваннях використовуються прискорюючі чинники, що залежать від виду і механізму відмов даного компонента (складових) і не зменшують (зберігають) ресурс виробу в цілому</p>
<p>При розробці як показник надійності був заданий середній наробіток до відмови</p> <p>При розробці був заданий список дозволених або заборонених до застосування компонентів</p> <p>Компоненти підрозділялися за придатністю щодо застосування у військовій, промисловій або комерційній апаратурі</p> <p>Проводиться періодичне ТО згідно з експлуатаційною документацією</p>	<p>При розробці як показник надійності задається гарантований термін служби апаратури та її технічний ресурс</p> <p>При розробці задається список заборонених виготовлювачів (постачальників) та список дозволених до застосування компонентів</p> <p>Компоненти підрозділяються за придатністю до роботи за визначених умов навколишнього середовища з вказівкою на те, в якій позиції і в якій апаратурі</p> <p>Проводиться ТО за станом об'єкта в цілому чи його складових частин</p>

Закінчення табл. 7.1

Старі принципи забезпечення надійності	Сучасні принципи забезпечення надійності
Після зберігання об'єкта проводиться ТО за станом згідно з експлуатаційною документацією	Після зберігання об'єкту проводиться ТО за станом згідно з експлуатаційною документацією, а також технічне діагностування з заміною потенційно ненадійних складових
Після відмови в експлуатації виконується ремонт та перевірка роботи об'єкта згідно з ремонтною документацією	Після відмови в експлуатації виконується ремонт та перевірка роботи згідно з ремонтною документацією, а також технічне діагностування виробів АТ із заміною потенційно ненадійних складових
Модернізація об'єкта здійснюється головним чином з метою поліпшення тактико-технічних характеристик	Модернізація об'єкта здійснюється для поліпшення тактико-технічних характеристик та підвищення показників безвідмовності та довговічності
Надійність забезпечується при задоволенні вимог замовника	Надійність забезпечується при задоволенні вимог замовника

У поняття "керування виробництвом" вкладається більш широкий зміст, ніж у застосовуваному сьогодні понятті "статистичний керований технологічний процес", у якому за допомогою статистичного регулювання забезпечуються точність та стабільність контрольованих параметрів.

Для забезпечення максимальної ефективності надійнісно-орієнтованого керування технологією виробництва необхідна спеціальна **експертна система**. Основними компонентами якої є наявність баз даних по характерних дефектах виробів АТ, моделям деградацій їх відмов із характерними дефектами; бази поточних даних з характерних дефектів конкретних типів елементів та матеріалів, з дефектів, характерних для конкретного технологічного процесу виготовлення. Експертна система на підставі даних про поточний стан технологічного процесу виробництва, рівня і характеру дефектності повинна виробляти в реальному масштабі

часу конкретні рекомендації щодо керування процесом виробництва з урахуванням необхідних показників якості і надійності та рентабельності виробництва. Зокрема, це можуть бути рекомендації щодо коригування тестового межопераційного контролю, і номенклатури контрольованих параметрів, рекомендацій щодо коригування окремих технологічних операцій або введення додаткових відбраковуєчих випробувань.

Ідея використання відбраковуєчих випробувань, як інструмента керування якістю, вважається дуже перспективною.

Суть випробування полягає у введенні додаткових відбраковочних випробувань, у яких рівень дефектів не перевищує припустимого значення.

Відбраковуєчі випробування, зокрема **технологічні тренувальні прогони**, сьогодні є невід'ємним етапом технології виробництва практично усіх видів виробів радіоелектроніки. Їх мета - стимуляція процесів деградацій і відмов дефектних виробів, або "випалювання" дефектів.

Ще одним видом відбраковуєчих випробувань є **діагностичні випробування**, що дозволяють виявляти приховані дефекти виробів на основі контролю інформативних параметрів. Особливість діагностичних відбраковуєчих випробувань – це їхній індивідуальний характер, який обумовлений необхідністю контролю кожного виробу або елемента, а також орієнтація на визначений вид дефекту. Тому діагностичні методи можуть використовуватись не завжди. Обумовлено це як відсутністю методів і засобів діагностування стосовно окремих видів дефектів, так і великою трудоємністю окремих видів контролю.

Останнім часом все ширше застосовується **метод "передбачати та попереджати"**. Цей метод припускає використання в процесі виробництва виробів ряду пристроїв та засобів, які дозволяють усунути дефектні деталі; методів опрацювання і запобігання похибок та дефектів, які з'являються у виробі, виключення робочих прийомів, при котрих можлива поява дефектів у виробі або пропускання дефектних матеріалів, напівфабрикатів та деталей. По своїй суті цей метод забезпечує виробництво з „нулем” дефектів.

Цей принцип припускає усунення випадків через недостатню тренуваність, недисциплінованість та інші подібні причини появи

дефектів, а також таку систему організації виробництва, при якій наслідком виявлення дефекту у виробі є дослідження засобу виробництва, інструмента, матеріалів тощо з метою встановлення причини дефекту та усунення можливості появи подібних дефектів у перспективі.

Система "передбачати та попереджати" здійснює:

- виявлення дефекту;
- усунення дефекту;
- процес регулювання і удосконалення засобів виробництва

для попередження появи дефектів надалі.

Проте цей метод не є універсальними. Причини дефектів можуть бути різноманітними і не завжди ці методи можуть бути використані для попередження й усунення дефектів. Вони не можуть усунути необхідність правильної організації розробки, необхідність урахування в розробках досвіду досліджень і випробувань, а також правильного вибору вихідних матеріалів, методів їхньої обробки, тобто необхідність грамотної і бездефектної розробки, розрахунків, моделювання, випробувань і т.ін.

Для керування технологічними процесами успішно застосовується **принцип логіки непевності** (fuzzy logic), що використовується у випадках, коли хід процесів точно не визначений, має значний розкид, великі припуски, мінливу структуру, нелінійність тощо. Використання цього принципу дозволяє забезпечити високу надійність керування, необхідну точність реалізації вихідних даних процесу. Конструкція систем керування в значній мірі залежить від моделі керованого процесу. Для багатьох виробничих процесів створення таких моделей достатньо складне. Інформацію про динаміку процесів із високою точністю оцінити звичайно буває важко. В усіх цих випадках використання керування логікою непевності дозволяє створити надійну і точну систему керування.

Задачі які можна вирішувати за допомогою цього принципу дозволяють ефективно використовувати їх при конструюванні, оцінці надійності і визначенні шляхів забезпечення надійності, тобто при вирішенні задач керування надійністю.

Таким чином, безвідмовність виробів може бути забезпечена шляхом відповідного ефективного надійно-орієнтованого керування технологічними процесами, для чого необхідні:

- достовірні інформація як про характерні дефекти виготовлення, так і про відмови виробів АТ за умов експлуатації;
- ефективні методи і засоби впливів на окремі операції технологічного процесу виготовлення та ТО, спрямовані як на запобігання дефектоутворенню, так і на виявлення прихованих відмов та пошкоджень виробів АТ.

Управління якістю сьогодні дуже тісно пов'язано з економічною політикою, що здійснюється як окремими фірмами, так і державами в цілому. Дуже показово, що за кордоном розвиток сертифікації систем якості стає все більш навальним, а його поширення все більш масштабним.

Роботи щодо забезпечення якості продукції не повинні обмежуватися впровадженням комплексу стандартів ІСО 9000. Основою тут повинні бути дослідження першопричин: аналіз ринку, порівнянні дослідження і випробування, аналіз причин браку і відмов, маркетинг перспектив розвитку тощо. І тільки через це пролягає шлях до сертифікації продукції.

Для ефективного впровадження комплексу стандартів ІСО 9000 на вітчизняних підприємствах необхідно використовувати практичні досягнення в галузі забезпечення якості і надійності, вивчення причин дефектоутворення і механізмів відмов, особливостей технологічних процесів тощо. Тобто стандарти повинні бути адаптовані до реальних умов вітчизняного виробництва, конкретної продукції, реальних комплектуючих і матеріалів, існуючих дефектів, недоліків і похибок.

Запитання для самоперевірок

1. Накресліть схему системи керування надійністю АТ.
2. Назвіть принципи керування надійністю виробів АТ.
3. Обґрунтуйте призначення та шлях удосконалення інформаційного забезпечення системи керування надійністю АТ.
4. Які вам відомі особливості сучасних принципів забезпечення надійності виробів АТ?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Чинний від 1996-01-01.
2. ДСТУ 3433-96. Моделі відмов. Основні положення. – Чинний від 1999-01-01.
3. КОСТОЧКИН В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. -М.: Машиностроение, 1988.-272 с.
4. СМІРНОВ Н.Н., ІЦКОВИЧ А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию.-М.:Транспорт,1980.-216 с.
5. БАРЗИЛОВИЧ Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. -М.: Высш. шк., 1982.- 230 с.
6. БАРЗИЛОВИЧ Е.Ю., ВОСКОВОБОВ В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. –М.: Транспорт, 1984. – 318 с.
7. МАЛАМЕДОВ И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
8. БАЙХЕЛЬТ Ф., ФРАНКЕН П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
9. ІЦКОВИЧ А.А. Надежность летальных аппаратов и авиадвигателей. Учеб. пособие. – М.: МГТУ ГА, 1995. – 92 с.

Додаток 1

$$\text{Функція } \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

X	Сотенна частка				
	0	2	4	6	8
0.0	0.0000	0.0159	0.0319	0.0478	0.0638
0.1	0.0797	0.0955	0.1113	0.1271	0.1428
0.2	0.1585	0.1741	0.1897	0.2061	0.2205
0.3	0.2358	0.2510	0.2661	0.2812	0.2960
0.4	0.3108	0.3255	0.3401	0.3545	0.3688
0.5	0.3829	0.3969	0.4108	0.4245	0.4381
0.6	0.4515	0.4647	0.4778	0.4908	0.5035
0.7	0.5161	0.5385	0.5407	0.5527	0.5646
0.8	0.5763	0.5878	0.5991	0.6102	0.6211
0.9	0.6319	0.6424	0.6528	0.6628	0.6729
1.0	0.6827	0.6923	0.7017	0.7109	0.7199
1.1	0.7287	0.7373	0.7457	0.7539	0.7620
1.2	0.7699	0.7775	0.7850	0.7923	0.7994
1.3	0.8064	0.8132	0.8197	0.8262	0.8324
1.4	0.8385	0.8444	0.8501	0.8557	0.8611
1.5	0.8664	0.8715	0.8764	0.8812	0.8859
1.6	0.8904	0.8948	0.8990	0.9031	0.9079
1.7	0.91087	0.91557	0.91714	0.92159	0.92492
1.8	0.92814	0.93124	0.93423	0.93711	0.93989
1.9	0.94257	0.94514	0.94762	0.95000	0.95230
2.0	0.95450	0.95662	0.95865	0.96060	0.96247
2.1	0.96427	0.96599	0.96765	0.96923	0.97074
2.2	0.97219	0.97354	0.97491	0.97619	0.97739
2.3	0.97855	0.97966	0.98072	0.98172	0.98269
2.4	0.98360	0.98449	0.98534	0.98611	0.98686
2.5	0.98758	0.98825	0.98891	0.98959	0.99012
2.6	0.99068	0.99121	0.99171	0.99212	0.99263
2.7	0.99207	0.99347	0.99386	0.99422	0.99456
2.8	0.98490	0.99520	0.99549	0.99576	0.99602
2.9	0.99627	0.99650	0.99672	0.99692	0.99712
3.0	0.99730	0.99747	0.99763	0.99779	0.99793

Додаток 2

Щільність імовірності $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$

X	Сотенна частка				
	0	2	4	6	8
0.0	0.3989	0.3989	0.3986	0.3982	0.3977
0.1	0.3970	0.3961	0.3951	0.3939	0.3925
0.2	0.3910	0.3894	0.3876	0.3857	0.3836
0.3	0.3814	0.3790	0.3765	0.3739	0.3712
0.4	0.3683	0.3653	0.3621	0.3589	0.3555
0.5	0.3521	0.3485	0.3448	0.3410	0.3372
0.6	0.3332	0.3292	0.3251	0.3209	0.3166
0.7	0.3123	0.3079	0.3034	0.2989	0.2943
0.8	0.2897	0.2850	0.2803	0.2756	0.2709
0.9	0.2661	0.2613	0.2556	0.2516	0.2468
1.0	0.2420	0.2371	0.2323	0.2275	0.2227
1.1	0.2179	0.2131	0.2083	0.2036	0.1989
1.2	0.1942	0.1895	0.1849	0.1804	0.1759
1.3	0.1714	0.1669	0.1626	0.1582	0.1539
1.4	0.1497	0.1456	0.1415	0.1374	0.1334
1.5	0.1295	0.1257	0.1219	0.1182	0.1145
1.6	0.1109	0.1074	0.1040	0.1006	0.0973
1.7	0.0940	0.0909	0.0878	0.0848	0.0818
1.8	0.0790	0.0761	0.0734	0.0707	0.0681
1.9	0.0656	0.0632	0.0608	0.0584	0.0562
2.0	0.0540	0.0519	0.0498	0.0478	0.0459
2.1	0.0440	0.0422	0.0410	0.0387	0.0371
2.2	0.0355	0.0339	0.0325	0.0310	0.0297
2.3	0.0283	0.0270	0.0258	0.0246	0.0235
2.4	0.0224	0.0213	0.0203	0.0194	0.0184
2.5	0.0175	0.0167	0.0158	0.0151	0.0143
2.6	0.0136	0.0125	0.0122	0.0116	0.0110
2.7	0.0104	0.0099	0.0093	0.0088	0.0084
2.8	0.0079	0.0075	0.0071	0.0071	0.0063
2.9	0.0060	0.0056	0.0053	0.0050	0.0047
3.0	0.0044	0.0042	0.0039	0.0037	0.0035

Додаток 3

Таблиця значень функції $-q_i \log_2 q_i$

q_i	$-q_i \log_2 q_i$	q_i	$-q_i \log_2 q_i$
0	0	0,31	0,5238
0,01	0,0664	0,32	0,5260
0,02	0,1128	0,33	0,5278
0,03	0,1518	0,34	0,5294
0,04	0,1858	0,35	0,5301
0,05	0,2161	0,36	0,5306
0,06	0,2435	0,37	0,5307
0,07	0,2686	0,38	0,5305
0,08	0,2915	0,39	0,5298
0,09	0,3126	0,40	0,5288
0,10	0,3322	0,41	0,5274
0,11	0,3403	0,42	0,5256
0,12	0,3671	0,43	0,5236
0,13	0,3826	0,44	0,5210
0,14	0,3971	0,45	0,5184
0,15	0,4105	0,46	0,5153
0,16	0,4230	0,47	0,5120
0,17	0,4346	0,48	0,5083
0,18	0,4453	0,49	0,5043
0,19	0,4552	0,50	0,5000
0,20	0,4644	0,50	0,5000
0,21	0,4728	0,51	0,4954
0,22	0,4806	0,52	0,4906
0,23	0,4877	0,53	0,4854
0,24	0,4941	0,54	0,4800
0,25	0,5000	0,55	0,4744
0,26	0,5053	0,56	0,4685
0,27	0,5100	0,57	0,4623
0,28	0,5142	0,58	0,4558
0,29	0,5179	0,59	0,4491
0,30	0,5211	0,60	0,4422

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. НАДІЙНІСТЬ ЯК КОМПЛЕКСНА ВЛАСТИВІСТЬ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ	7
1.1. Терміни та визначення основних понять у теорії надійності	7
1.2. Надійність авіаційної техніки та безпека польотів	13
1.3. Задачі дослідження надійності АТ та особливості їхнього вирішення в експлуатації	17
2. ОСНОВИ ФІЗИЧНОЇ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	24
2.1. Фізична сутність відмов об'єктів АТ	24
2.2. Аналіз фізики відмов та пошкоджень повітряних суден та авіаційних двигунів	28
2.3. Збір інформації про надійність виробів АТ за умов експлуатації	32
2.4. Застосування фізичних моделей надійності виробів авіаційної техніки	37
3. ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	41
3.1. Характеристики надійності	41
3.2. Характеристика надійності відновлювальних об'єктів	47
3.3. Математичні моделі надійності	52
3.4. Показники надійності	58
4. ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ	69
4.1. Плани спостережень	69
4.2. Побудова моделі раптових відмов	73
4.3. Побудова моделей поступових відмов	76
4.4. Оцінка показників надійності	81
4.5. Моделі формування параметричних відмов виробів АТ	85
5. ПРИНЦИПИ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ АТ	94
5.1. Надійність складних систем	94
5.2. Аналіз надійності функціональних систем методом структурних схем	102
5.3. Аналіз надійності функціональних систем методом логічних схем	106
5.4. Аналіз надійності функціональних систем матричним методом	108
5.5. Аналіз надійності відновлювальних систем АТ	110
6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ	114
6.1. Етапи формування надійності авіаційної техніки	114
6.2. Конструктивно-технологічні аспекти забезпечення надійності авіаційної техніки	119
6.3. Забезпечення надійності авіаційної техніки і збереження придатності до польотів повітряних суден та авіаційних двигунів	123
6.3.1. Ефективність процесу технічної експлуатації повітряних суден та авіадвигунів	123
6.3.2. Аналіз контролепридатності, вибір та обґрунтування діагностичних параметрів об'єктів експлуатації	134
6.3.3. Оптимізація алгоритмів пошуку несправностей функціональних систем повітряних суден та АД	143
7. КЕРУВАННЯ НАДІЙНІСТЮ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ	148
7.1. Задачі та схема процесу керування надійністю авіаційної техніки	148
7.2. Інформація забезпечення надійності об'єктів експлуатації	154
7.3. Сучасні принципи забезпечення льотної придатності повітряних суден та авіадвигунів	158
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	164
ДОДАТКИ	165

Навчальне видання

БУРЛАКОВ Вадим Іванович
ЛЄНКОВ Сергій Васильович
САЛІМОВ Рінат Мартинович

ОСНОВИ ТЕОРІЇ
НАДІЙНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН
ТА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Навчальний посібник

Редактор *Л.С. Стаквель*
Технічний редактор *А.І. Лаврінович*

Підп. до друку 20.04.04. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. фарбовідб. 44. Ум. друк. арк. 10,0. Обл.-вид. арк. 10,75.
Тираж 100 пр. Замовлення № 102-1. Вид. №46/І.

Видавництво НАУ
03058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002.