

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний авіаційний університет**

**А.В. Скрипець, В.К. Мамонтов, О.М. Кузнєцов,  
Ю.В. Грищенко, В.І. Ковтун**

**МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ  
АВТОМАТИЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ**

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

**Київ 2006**

УДК 629.735.064.5:681.518.52 (075.8)

ББК О 560-082.05 я 7

**М 545**

*Рецензенти:* відділ перспективних розробок Державного Київського конструкторського бюро “Луч” (начальник відділу Б.І. Доценко, д-р техн. наук, професор); М.М.Дмитрієв, проректор Національного транспортного університету з наукової роботи, д-р техн. наук, професор, Заслужений працівник народної освіти України; В.В. Павлов, завідувач відділом Міжнародного науково-навчального Центра інформаційних технологій і систем доктор технічних наук, професор.

Під редакцією професора А.В. Скрипця

**Скрипець А.В., Мамонтов В.К., Кузнєцов О.М.,  
Грищенко Ю.В.**

**М545** Методи забезпечення довговічності автоматичних засобів контролю: Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2005. – 80 с.

**ISBN**

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

В навчальному посібнику розглянуто широкий спектр питань забезпечення високого рівня довговічності автоматичних засобів контролю.

Призначається для студентів спеціальності 8.100107 “Обладнання повітряних суден” при вивченні навчальних дисциплін: “Теорія надійності систем авіоніки”, “Методи та засоби технічного діагностування авіаційного обладнання”, “Основи побудови інформаційно-діагностичних систем” та ін. Він може бути корисним і для студентів інших спеціальностей при вивченні ними проблем надійності та діагностування складних технічних систем, а також для інженерів, які розробляють і експлуатують автоматичні засоби контролю авіаційної техніки.

**ISBN**

**ББК О 560-082.05 я 7**

© А.В. Скрипець, В.К. Мамонтов,  
О.М. Кузнєцов, Ю.В. Грищенко,  
2006

## ПЕРЕДМОВА

Складність конструкцій сучасних технічних об'єктів та високі вимоги до надійності і довговічності обумовлюють необхідність визначення їхнього технічного стану в процесі експлуатації з використанням автоматичних засобів контролю (АЗК).

Автоматичні засоби контролю є вирішенням подальшого етапу проблеми створення ручних і напівавтоматичних засобів контролю, призначених для перевірки працездатності і пошуку несправностей в різних за складністю технічних об'єктах.

Недоліками ручних засобів контролю є мала швидкодія, недостатня достовірність контролю та висока вартість перевірок.

В результаті використання АЗК значно скорочується час підготовки об'єкта, підвищується його працездатність (за рахунок відновлення працездатного стану) та готовність його до використання. Крім того, підвищується економічна ефективність експлуатації об'єкта.

Основне призначення АЗК полягає у правильному визначенні, протягом певного проміжку часу, стану об'єкта. Якщо АЗК призначені для прогнозування працездатності об'єкта, то вони повинні передбачати поведінку параметрів або об'єкта в цілому, тобто визначати, оцінювати його ефективність, яку він матиме через певний час. АЗК, які використовують в загальній системі підготовки об'єкта, можуть давати керуючі сигнали на включення резервних блоків, заміну блоків, що відмовили, здійснювати регулювання, настроювання тощо. У цьому випадку АЗК стає керуючою системою і дозволяє підтримувати ефективність дії об'єкта на заданому рівні. У всіх випадках повинна виконуватися оцінка ефективності АЗК.

У зв'язку з цим до АЗК ставлять досить високі вимоги щодо надійності й довговічності, від яких значною мірою залежать економічні показники з огляду на те, що ці системи мають високу вартість, а їх виготовлення й експлуатація є надзвичайно трудомісткими процесами. Крім того, від довговічності АЗК значною мірою залежить тривалість експлуатації об'єктів контролю, термін служби яких порівняно великий.

Не дивлячись на досить значний обсяг публікацій, які присвячені проблемі довговічності (особливо – механічних систем), до-

довговічність АЗК, як специфічних складних технічних об'єктів, практично в них не розглядається. Тому цей навчальний посібник може бути корисним не тільки для студентів вищих навчальних закладів, але й для тих, хто працює в галузі проектування, виробництва та експлуатації АЗК.

В навчальному посібнику спочатку розглянуто показники якості АЗК, причому, особливу увагу приділено довговічності і чинникам, які на неї впливають; визначено критерії граничного стану АЗК. Далі розглядаються методи оцінювання показників довговічності АЗК на етапах їх розробки й експлуатації. Після цього розглянуто методи забезпечення і збільшення довговічності на цих важливих етапах життєвого циклу АЗК. В кінці навчального посібника наведено методика прогнозування технічного стану АЗК та визначення їх основних частин, які підлягають заміні за результатами прогнозування.

## ГЛАВА 1. ДОВГОВІЧНІСТЬ АЗК

### 1.1. Показники якості АЗК

Основною метою контролю технічного стану, який здійснюють за допомогою АЗК, є оперативне отримання необхідної інформації про стан об'єкта контролю (ОК), яка має високу достовірність. Це визначає вибір основних показників якості АЗК.

Найважливішим критерієм (показником) якості АЗК є інструментальна достовірність контролю, яка визначається як ступінь об'єктивного відображення результатів контролю істинного технічного стану ОК. Достовірність контролю характеризується ймовірностями виникнення помилок першого й другого роду. Помилка першого роду є подія, яка полягає в тому, що працездатний об'єкт контролю за результатами контролю вважають непрацездатним. Ймовірність помилки першого роду часто називають ризиком виробника і позначають літерою  $A$ .

Помилка другого роду є подія, яка полягає в тому, що непрацездатний за результатами контролю ОК визнають працездатним. Ймовірність помилки другого роду називають ризиком замовника й позначають літерою  $B$ .

Достовірність контролю визначають такі чинники: точність вимірювання контрольованих параметрів; повнота контролю, завадостійкість і безвідмовність складових частин АЗК; методи самоконтролю та їх ефективність; рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу тощо. Достовірність контролю залежить також від надійності ОК, складу контрольованих параметрів (КП), допусків на них та застосованих методик контролю.

Абсолютна достовірність контролю (достовірність розбравки) визначається співвідношенням

$$D = 1 - A - B. \quad (1.1)$$

Для контролю працездатності з багатьма параметрами використовують такі рівняння:

$$A = \prod_{i=1}^N p_i - \prod_{i=1}^N (p_i - \alpha_i); \quad (1.2)$$

$$B = \prod_{i=1}^N (p_i - \alpha_i + \beta_i) - \prod_{i=1}^N (p_i - \alpha_i); \quad (1.3)$$

$$p = \prod_{i=1}^N p_i, \quad (1.4)$$

де  $N$  – кількість КП;

$p_i$  – ймовірність працездатності ОК за  $i$ -им КП;

$p$  – ймовірність працездатності ОК;

$\alpha_i$  – ризик виробника під час контролю  $i$ -го КП;

$\beta_i$  – ризик замовника під час контролю  $i$ -го КП.

Параметри  $\alpha_i, \beta_i$  головним чином залежать від похибок відповідних каналів контролю.

Другим важливим показником якості АЗК є продуктивність  $\Pi_p$ , яка залежить від властивостей ОК і швидкодії АЗК. Продуктивність визначається кількістю ОК, які контролюють, за одиницю часу:

$$\Pi_p = \frac{k_a}{t_k}, \quad (1.5)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт готовності;

$t_k$  – час контролю одного ОК, год.

Відповідно коефіцієнт готовності дорівнює:

$$k_2 = \frac{T_{н.в}}{T_{н.в} + T_{ч.в}},$$

де  $T_{н.в}$  – середнє напрацювання на відмову;

$T_{ч.в}$  – середній час відновлення.

Однією з основних властивостей, які визначають якість будь-якого технічного засобу контролю, у тому числі й АЗК, є надійність – властивість об'єкта зберігати з часом у встановлених межах (граніцях) значення всіх параметрів, які характеризують його здатність виконувати задані функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [1].

*Надійність АЗК* – комплексна властивість, яка складається з поєднання властивостей: безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збережності.

*Безвідмовність* – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу або напрацювання. Показником безвідмовності АЗК є середнє напрацювання на відмову.

*Ремонтпридатність* – властивість об'єкта, яка полягає у пристосованості до підтримання й відновлення працездатного стану за допомогою технічного обслуговування й ремонту. Кількісно ремонтпридатність характеризується середнім часом відновлення.

*Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану за умови встановленої системи технічного обслуговування й ремонту.

Показники довговічності АЗК: середній термін служби, середній ресурс, призначений термін служби, призначений ресурс, гамма-відсотковий ресурс, гамма-відсотковий термін служби.

*Збережуваність* – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, які характеризують здатність об'єкта виконувати визначені функції протягом і після зберігання та (або) транспортування. Показником збережуваності є середній час зберігання.

Якість АЗК визначається також такими експлуатаційними характеристиками: мобільністю, яка залежить від габаритів і маси; глибиною самоконтролю; рівнем забезпечення локалізації несправностей; можливістю прогнозування технічного стану ОК і АЗК; зручністю обслуговування; наявністю сервісних програм для обслуговування тощо.

З наведених показників якості найбільше змінюються з часом в процесі експлуатації достовірність контролю й безвідмовність.

## **1.2. Показники довговічності АЗК**

Довговічність будь-якого технічного об'єкта, у тому числі і АЗК, характеризується закономірностями настання його граничного стану.

Згідно з [1] граничний стан об'єкта – це стан, за якого подальша експлуатація об'єкта неприпустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе або недоцільне.

Після досягнення граничного стану експлуатація об'єкта припиняється, і він підлягає списанню або капітальному (середньому, регламентованому) ремонту, якщо це передбачено експлуатаційною документацією.

Подія, яка полягає в переході об'єкта до граничного стану, за аналогією з безвідмовністю подібна до такої події, як відмова. Перехід виробу до граничного стану визначається значною кількістю

чинників, тому такий перехід для кожного окремого виробу є випадковою подією, а час або напрацювання від початку експлуатації до настання граничного стану є випадковими величинами.

Календарна тривалість від початку експлуатації об'єкта або його відновлення після ремонту певного виду до переходу до граничного стану називається терміном служби, а напрацювання об'єкта (тривалість або обсяг роботи) від початку експлуатації (або її відновлення після ремонту певного виду до переходу до граничного стану) називається технічним ресурсом, або ресурсом. Позначимо термін служби –  $t_m$ , а ресурс –  $t_p$ . У загальному випадку  $t_m$  і  $t_p$  є випадковими величинами і являють собою запас можливої календарної тривалості експлуатації і напрацювання об'єкта.

До показників довговічності, які є кількісними характеристиками, належать:

- середній ресурс –  $T_p$ ;
- середній термін служби –  $T_m$ ;
- гамма-відсотковий ресурс –  $T_{p\gamma}$ ;
- гамма-відсотковий термін служби –  $T_{m\gamma}$ ;
- призначений ресурс –  $T_{p.np}$ ;
- призначений термін служби –  $T_{m.np}$ .

Показники  $T_p$ ,  $T_m$ ,  $T_{p\gamma}$ ,  $T_{m\gamma}$  пов'язані з характеристиками законів розподілу випадкових величин  $t_m$  і  $t_p$ .

Середній ресурс – це математичне сподівання ресурсу:

$$T_p = \int_0^{\infty} t_p f_1(t_p) dt_p, \quad (1.6)$$

де  $f_1(t_p)$  – щільність розподілу ресурсу.

Середній термін служби  $T_m$  – це математичне сподівання терміну служби:

$$T_m = \int_0^{\infty} t_m f_2(t_m) dt_m, \quad (1.7)$$

де  $f_2(t_m)$  – щільність розподілу терміну служби.

Гамма-відсотковий ресурс  $T_{p\gamma}$  – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з заданою ймовірністю  $\gamma$ , яка виражена у відсотках: гамма-відсотковий ресурс відповідає



$\gamma$ - відсотковому квантилю розподілу ресурсу і визначається з такого рівняння:

$$1 - \int_0^{T_{\gamma}} f_1(t_p) dt_p = \frac{\gamma}{100\%}. \quad (1.8)$$

Гамма-відсотковий термін служби  $T_{m\gamma}$  – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкта, протягом якої він не досягне граничного стану з заданою ймовірністю, яка виражена у відсотках. Гамма-відсотковий термін служби визначається з рівняння:

$$1 - \int_0^{T_{m\gamma}} f_2(t_m) dt_m = \frac{\gamma}{100\%}. \quad (1.9)$$

За умови симетричних законів розподілу  $t_p$  і  $t_m$  гамма-відсотковий ресурс  $T_{p\gamma}$  і гамма-відсотковий термін служби  $T_{m\gamma}(\gamma=50\%)$  збігаються відповідно з середнім ресурсом  $T_p$  і середнім терміном служби  $T_m$ .

Призначений ресурс  $T_{p,np}$  – сумарне напрацювання об'єкта, після досягнення якого застосування об'єкта за призначенням має бути припинено незалежно від його стану.

Призначений термін служби  $T_{m,np}$  – календарна тривалість експлуатації об'єкта, при досягненні якої застосування об'єкта за призначенням повинно бути припинено незалежно від його технічного стану.

Використання показників  $T_{p,np}$ ,  $T_{m,np}$  має на меті забезпечення завчасного передбаченого припинення застосування об'єкта за призначенням відповідно до вимог безпеки або економічної доцільності. Звичайно ці показники призначають для виробів військової і авіаційної техніки, а також інших виробів, які виконують відповідальні завдання. При встановленні цих показників ресурс і термін служби об'єкта вже не є випадковими величинами, а критерії граничного стану визначаються величинами призначеного показника, оскільки всі виробы, незалежно від запасу ресурсу (терміну служби), ніби переходять до граничного стану після досягнення напрацюванням (часом експлуатації) значення призначеного ресурсу (призначеного терміну служби).

Для автоматичних засобів контролю вимоги до довговічності встановлюють звичайно у вигляді призначеного ресурсу і призначеного терміну служби.

Проте, для деяких типів АЗК ставлять вимоги до довговічності у вигляді середнього ресурсу і середнього терміну служби. У кількісному вимірі вимоги до призначеного (середнього) ресурсу становлять від 4000 год до 10000 год; вимоги до призначеного (середнього) терміну служби – від 10 до 15 років. Але для деяких видів АЗК вимоги до встановлення (або продовження) терміну служби становлять 16-20 років, що зумовлено специфікою використання об'єктів контролю (довготривалим терміном експлуатації).

### **1.3. Чинники, які впливають на довговічність АЗК**

На довговічність АЗК негативно впливають процеси зношення і старіння, причому, старіння може бути фізичним і моральним.

Фізичне старіння визначається структурними змінами речовин і матеріалів, з яких виготовлені АЗК й комплектуючі вироби, протягом календарного часу експлуатації. Суттєво впливають на цей процес умови експлуатації: температурний режим, вологість, сонячна радіація тощо. Старінням матеріалів, згідно з [9], називають процеси зміни їхніх фізико-хімічних властивостей з часом в умовах довготривалого зберігання і експлуатації. Старіння звичайно обумовлено недостатньо стабільним (незрівноваженим) станом матеріалу і поступовим його переходом у стабільний (зрівноважений) стан.

Старінням металів і сплавів вважають процес зміни з часом їхніх властивостей, який являє собою перетворення, що відбуваються в металі чи сплаві, які перебувають у твердому стані. Це – мартенситне перетворення і розпад мартенситної структури, розчинення у твердому стані і розпад пересичених твердих розчинів, алотропічне перетворення, впорядкування твердих розчинів, утворення твердого розчину з евтектоїдної суміші.

Старінню напівпровідників сприяють субмікроскопічні дефекти матеріалу, наявність у ньому домішок, мікроскопічні дефекти на поверхні, зміна температури, вологості. Крім того, старіння може викликати зменшення напруги пробою, мікроплазмові ефекти, посилення шуму і зворотного струму тощо.

Технічні полімерні матеріали старіють, в основному, у зв'язку з процесами, які спричиняють деструкцію полімерів, тобто розпад основних ланцюгів макромолекул на уламки простішої будови, або структурування, тобто зміну будови макромолекул і взаємодію між ними без розриву основного ланцюга. Під час старіння полімерів змінюються молекулярна вага, структура, а також взаємодія макромолекул, які визначають фізико-механічні властивості цих матеріалів: міцність, твердість, пластичність, розчинність, діелектричні властивості. Внаслідок іонізації утворюються окисли азоту, які можуть спричинити хімічні зміни в матеріалі, що зменшує його електричну міцність (наприклад, у конденсаторах, кабелях, обмотках електродвигунів тощо).

Зміна фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалів спричиняє зміну параметрів АЗК і виникнення відмов. Проте, одночасно з погіршенням параметрів іноді спостерігається їх стабілізація або зменшення швидкості зміни. Але деградаційні процеси все ж таки переважають. В процесі виробництва для стабілізації параметрів апаратури часто застосовують технологічні тренування.

Зношення АЗК визначається процесами електричного й механічного зношування апаратури, яка перебуває у робочому, тобто у навантаженому стані. Зношення виявляється у вигляді зміни розмірів, форми, в деформації виробу, а також у структурних змінах матеріалів (наприклад, виникнення або збільшення тріщин, зміна кристалічної структури речовини). Зношення є одним з основних чинників, які призводять до граничного стану або відмови, особливо у механічних системах.

Зношення є складним процесом, розрізняють декілька його видів. Так, під час електроерозійного зношення руйнівну дію чинять, в основному, механічне зношення і електрична ерозія, яка викликає пошкодження електричних з'єднань, реле, перемикачів, потенціометрів, електродвигунів, генераторів з колекторами тощо.

На початку експлуатації АЗК зношення може стабілізувати параметри апаратури, але при більшому напруженні може призвести до руйнування, яке в певний момент часу може стати лавиноподібним.

Таким чином, на початковому етапі експлуатації фізичне зношення і старіння елементів АЗК виявляються у зменшенні в них внутрішніх напружень, спричинених технологічним процесом вироб-

ництва, у зміні структури матеріалів при припрацюванні рухомих з'єднань, у відмовах, які виникають через виробничі дефекти. Це спричиняє відносно швидку зміну параметрів АЗК. З часом швидкість зміни параметрів поступово зменшується, зменшується також і величина параметра потоку відмов, що свідчить про закінчення етапу припрацювання ( $t_{np}$ ) і перехід до етапу нормальної експлуатації АЗК ( $t_{н.е}$ ). Після етапу нормальної експлуатації настає етап фізичного старіння і зношення елементів АЗК ( $t_{зн}$ ), внаслідок чого настає поступова деградація структури матеріалів і прискорений дрейф параметрів (рис.1.1).

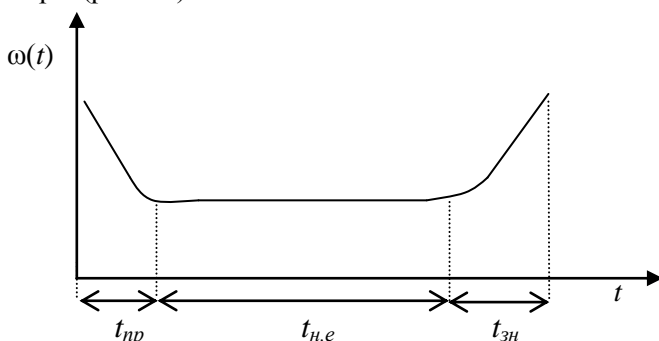


Рис. 1.1. Залежність параметра потоку відмов  $\omega(t)$  від часу  $t$

Це призводить до суттєвого збільшення параметра потоку відмов  $\omega(t)$ , кількості переміжних відмов апаратури і, врешті-решт, — до недоцільності її подальшого використання.

Поряд з фізичним старінням і зношенням підставою для визнання подальшої експлуатації АЗК недоцільною може бути також моральне старіння. Це може бути обумовлено:

- припиненням виробництва або експлуатації технічних виробів, для контролю яких призначені АЗК;
- припиненням виробництва покупних виробів або матеріалів, застосованих в конструкції АЗК, у зв'язку з чим суттєво ускладнюється процес відновлення;
- створенням аналогічних АЗК з кращими техніко-економічними показниками або нових матеріалів і комплектуючих виробів, які дозволяють створити аналогічні АЗК з набагато вищими техніко-економічними показниками.

#### 1.4. Критерії граничного стану АЗК

Відповідно до [1] критерій граничного стану – це ознака або сукупність ознак граничного стану об'єкта, встановлених нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією. Ознаки граничного стану наводять в документації для того, щоб обслуговуючий персонал міг своєчасно фіксувати настання граничного стану і припиняти експлуатацію (або застосування за призначенням) об'єкта, для якого настало неусувне порушення вимог безпеки або неприпустиме зниження ефективності експлуатації, або відхилення показників якості за межі встановлених норм тощо.

До переліку ознак граничного стану технічних об'єктів належать:

- припинення (повне або часткове) об'єктом виконання заданих функцій, яке не піддається відновленню наявними засобами;
- відхилення заданих показників якості за межі встановлених норм при відсутності технічних можливостей регулювання в процесі технічного обслуговування і поточного ремонту або заміни несправної складової частини;
- досягнення складовими частинами об'єкта граничного стану, який призводить до припинення функціонування або виходу показників якості за встановлені межі;
- досягнення покупними складовими частинами призначеного ресурсу і (або) терміну служби;
- суттєве зниження безвідмовності об'єкта;
- виникнення неусувних процесів, які перешкоджають функціонуванню апаратури: виділення диму або виникнення запаху гару з її складових частин через деякий час після увімкнення, наявність грибкових утворень на елементах і платах електронних схем, старіння ізоляції електропроводів, масове руйнування паяних з'єднань (олов'яна чума) тощо;
- економічні фактори (прогресуюче збільшення витрат, пов'язаних з експлуатацією АЗК).

Найважливішими властивостями ознак граничного стану мають бути мінімальна ймовірність помилкової оцінки і простота його визначення.

Використовуючи визначення граничного стану технічного об'єкта і враховуючи призначення АЗК, основні вимоги до них та

їхніх показників якості, сформулюємо поняття граничного стану АЗК як специфічного об'єкта техніки.

Граничним станом АЗК вважають такий стан, за якого хоча б один з основних показників якості (безпека, безвідмовність, інструментальна достовірність контролю) знижується нижче визначеного рівня, і відновлення необхідного рівня шляхом поточного ремонту на місці експлуатації неможливе.

Перелічені показники якості визначити шляхом безпосереднього спостереження неможливо, вони визначаються сукупністю параметрів або кількісних показників, для яких можуть бути встановлені гранично допустимі значення (допуски).

Сукупність цих параметрів (кількісних показників) вважатимемо сукупністю ознак граничного стану АЗК або критерієм граничного стану.

Безпеку АЗК визначають такі параметри: опір ізоляції; перехідний опір захисного заземлення; рівень паразитного НВЧ-випромінювання; параметри, які визначають безпечне функціонування пневмосистеми та вантажопідіймальних засобів.

Встановлені допуски на ці параметри наведено в конструкторській (КД) і експлуатаційній (ЕД) документації. Вимірювання цих параметрів виконують за допомогою стандартних засобів вимірювання, контроль частини цих параметрів може здійснюватись під час технічного обслуговування.

Інструментальна достовірність контролю визначається похибками вимірювання каналів контролю, параметрів об'єкта контролю, а похибки, в свою чергу, залежать від параметрів функціонального обладнання. В процесі експлуатації параметри, які впливають на інструментальну достовірність контролю, контролюють під час технічного обслуговування за допомогою засобів вимірювання, а також під час проведення самоконтролю АЗК за спеціальними програмами самоконтролю. Допуски на ці параметри задаються технічними умовами (ТУ) і наведені в ЕД.

Якщо будь-який параметр, пов'язаний з безпекою, вийшов за межі допуску внаслідок раптової відмови, наприклад, електродіоелемента, і якщо ця відмова може бути усунена шляхом поточного ремонту, то такий вихід параметра за межі допуску не можна вважати настанням граничного стану. Це ж саме стосується і вихо-

ду параметра за межі допуску, який усувають шляхом регулювання під час технічного обслуговування.

Безвідмовність АЗК, як відновного виробу, характеризується середнім напрацюванням на відмову  $T_{\text{в}}$ , а динаміка безвідмовності – параметром потоку відмов  $\omega(t)$ , який будемо вважати параметром безвідмовності. Визначення  $\omega(t)$  здійснюється відомими методами математичної статистики за даними про напрацювання і відмови одного або декількох зразків АЗК. Допуском для  $\omega(t)$  може бути величина

$$\omega_{\text{дон}} = \frac{1}{T_{\text{в.з}}},$$

де  $T_{\text{в.з}}$  – задане в технічній документації значення напрацювання на відмову.

Проте, за деяких умов можуть бути встановлені й інші значення  $\omega_{\text{дон}}$ .

Крім того, безвідмовність АЗК додатково характеризується частотою перебоїв, які суттєво впливають на продуктивність контролю і на впевненість обслуговуючого персоналу у правильному функціонуванні АЗК і в достовірності результатів контролю –  $\omega_{\text{пер}}(t)$ . Для визначення частоти перебоїв необхідно провести спеціальні роботи під час технічного огляду, які полягають у виконанні певної кількості циклів самоконтролю з фіксацією кількості перебоїв.

Допустима межа для  $\omega_{\text{пер}}(t)$  для конкретного зразка може бути встановлена на рівні  $k\omega_{\text{пер.поч}}$ , де:  $k$  – коефіцієнт ( $k = 1,5 - 3$ ),  $\omega_{\text{пер.поч}}$  – значення частоти перебоїв під час першого технічного огляду. Відомі також деякі ознаки граничного стану АЗК, які побічно характеризують всі розглянуті показники якості, але не можуть бути виражені у кількісній формі; стан АЗК за цими ознаками (параметрами) визначається експертним методом під час технічного огляду. До таких ознак належать: стан паяних з'єднань, стан лакофарбового і гальванічного покриття, наявність цвілеподібного грибка, стан рознімних з'єднань, кабелів тощо.

Оцінювання АЗК за цими параметрами може виконуватись експертами за чотирибальною системою: “незадовільно”, “задовільно”, “добре”, “відмінно”, а допуском може бути оцінка “задовільно”.

Таким чином, настання граничного стану АЗК фіксується виходом за межі допусків хоча б одного з таких параметрів:

$\xi_{B_i}(t), i = \overline{1, N_B}$  – параметри безпеки у кількості  $N_B$ ;

$\xi_{I_j}(t), j = \overline{1, N_n}$  – параметри, які характеризують інструментальну достовірність контролю, у кількості  $N_n$ ;

$\xi_{E_k}(t), k = \overline{1, N_E}$  – додаткові параметри, які визначають експертним шляхом, у кількості  $N_E$ ;

$\omega(t), \omega_{nep}(t)$  – параметри безвідмовності.

### Методичні вказівки

З метою скорочення часу підготовки об'єкта до використання за призначенням, підвищення ймовірності його працездатності та економічної ефективності експлуатації широко застосовуються автоматичні засоби контролю. В свою чергу, до них ставлять жорсткі вимоги щодо надійності й довговічності і, зокрема, достовірності контролю.

В результаті вивчення матеріалу глави слід отримати чітке уявлення про основні показники довговічності, вміти їх визначати. Необхідно звернути увагу на чинники, які впливають на довговічність АЗК на різних етапах експлуатації.

Уявлення про надійність і довговічність АЗК, як складової частини їх якості, не буде достатнім, якщо не розглянути критерії та ознаки граничного стану АЗК, після настання якого слід припинити його експлуатацію. Слід зазначити, що граничним станом вважають такий стан, за якого хоча б один з основних показників якості АЗК знижується нижче визначеного рівня, і відновлення необхідного рівня стану шляхом поточного ремонту на місці експлуатації неможливе.

### Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні показники якості АЗК.
2. Якими показниками характеризується достовірність контролю?



3. Які чинники визначають достовірність контролю?
4. Дайте визначення надійності АЗК і назвіть її властивості.
5. Дайте визначення і назвіть показники оцінки безвідмовності, ремонтопридатності, довговічності та збережності АЗК.
6. Назвіть основні показники довговічності АЗК і дайте їх визначення.
7. Назвіть чинники, які впливають на довговічність АЗК.
8. Дайте характеристику залежності параметра потоку відмов елементів АЗК від часу в процесі експлуатації АЗК.
9. Наведіть перелік ознак граничного стану технічних об'єктів.
10. На які параметри граничного стану АЗК встановлюють допуски в конструкторській і експлуатаційній документації?
11. Яким чином фіксується настання граничного стану АЗК?

## ГЛАВА 2. ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВГОВІЧНОСТІ АЗК

Вимоги до довговічності АЗК задаються технічним завданням і технічними умовами у вигляді вимог до її кількісних показників – призначеного (середнього) ресурсу і призначеного (середнього) терміну служби. Для підтвердження виконання цих вимог і для прийняття відповідних заходів для забезпечення потрібної довговічності на різних стадіях життєвого циклу АЗК слід проводити кількісне оцінювання показників довговічності АЗК.

### 2.1. Методи оцінювання показників довговічності АЗК на стадії розробки

Стадія розробки складається з таких етапів: аванпроект, ескізне і технічне проектування, розробка робочої КД, попередні випробування дослідних зразків. Кількісне оцінювання показників довговічності на стадії розробки проводять за однією з методик, які буде розглянуто нижче. Вибір тієї або іншої методики залежить від етапу, для якого проводять оцінювання, та від наявності і повноти відповідних вихідних даних.

#### 2.1.1. Поелементний аналіз

Принцип оцінювання довговічності, який розглядається, базується на інформації про довговічність комплектуючих електро-радіоелементів (ЕРЕ), яка міститься в нормативно-технічній документації (стандарти, ТУ) на ЕРЕ, причому, передбачається, що елементи конструкції, лакофарбові покриття та паяння мають настільки високу довговічність, що не впливають на довговічність виробу в цілому. Крім того, беруть умови, за яких взаємний вплив елементів відсутній, а особливості схемної побудови виробу не враховуються, тобто виріб розглядають як набір не пов'язаних між собою ЕРЕ, які мають певну довговічність.

До показників довговічності ЕРЕ в нормативно-технічній документації належать: мінімальне напрацювання ( $T_{mn}$ ), гамма-відсотковий ресурс  $T_{py}$  та мінімальний термін служби ( $T_{mt}$ ).

Мінімальне напрацювання ( $T_{mn}$ ) – це мінімальна тривалість роботи виробу, протягом якої у заданих режимах і умовах зберігається його працездатність, яку забезпечує виробник.

Мінімальний термін служби  $T_{mm}$  – мінімальна календарна тривалість експлуатації виробу в заданих режимах і умовах, протягом якої виробник гарантує працездатність за умови, що час роботи виробу не перевищить заданого мінімального напрацювання.

### **1. Оцінювання показників довговічності АЗК за мінімальним значенням показників довговічності ЕРЕ**

Ця методика базується на положеннях нормативно-технічної документації, згідно з якими мінімальне напрацювання і термін служби (збережність) ЕРЕ не повинні бути меншими (звичайно) за відповідні показники довговічності апаратури.

Призначений ресурс АЗК  $T_{p,np}$  у цьому випадку визначають таким чином:

$$T_{p,np} = \min_k \{T_{mk}\}, k = \overline{1, N_1}, \quad (2.1)$$

де  $N_1$  – кількість груп ЕРЕ з однаковим мінімальним напрацюванням;

$T_{mk}$  – мінімальне напрацювання елементів  $k$ -ої групи.

В свою чергу, мінімальний термін служби АЗК  $T_{m,np}$  визначають як

$$T_{m,np} = \min_s \{T_{ms}\}, s = \overline{1, N_2}, \quad (2.2)$$

де  $N_2$  – кількість груп ЕРЕ з однаковим мінімальним терміном служби;

$T_{ms}$  – мінімальний термін служби елементів  $s$ -ої групи.

Призначений ресурс АЗК приймають таким, що дорівнює найменшому значенню мінімального напрацювання елементів, а призначений термін служби таким, що дорівнює найменшому значенню мінімального терміну служби елементів.

Наприклад, якщо найменше значення мінімального напрацювання  $T_{mk}$  складає 4000 год, то призначений термін служби АЗК дорівнює 4000 год.

### **2. Оцінювання показників довговічності АЗК за $\alpha$ -відсотковою витратою ресурсу (терміну служби) елементів**

Ця методика базується на методиці оцінювання ресурсу електровимірювальних приладів, яку розроблено в Науково-дослідному інституті електронних приладів (м. Санкт-Петербург, Росія).

Припустимо, що АЗК складається з  $M$  комплектуючих ЕРЕ, тоді:

$$M = \sum_k^{M_r} n_k(\tau_{pk}), \quad (2.3)$$

де  $M_r$  – кількість груп ЕРЕ з однаковим мінімальним напрацюванням (мінімальним терміном служби);

$\tau_{pk}$  – мінімальне напрацювання (мінімальний термін служби) ЕРЕ  $k$ -ої групи (в подальшому – ресурс);

$n_k(\tau_{pk})$  – кількість елементів у групі.

Граничним станом АЗК вважають стан, коли витрачено ресурс не менше, ніж у  $\alpha\%$  ЕРЕ. Призначеним ресурсом (призначеним терміном служби) АЗК у цьому випадку вважають значення ресурсу ЕРЕ, які не увійшли у цей відсоток (рис. 2.1).

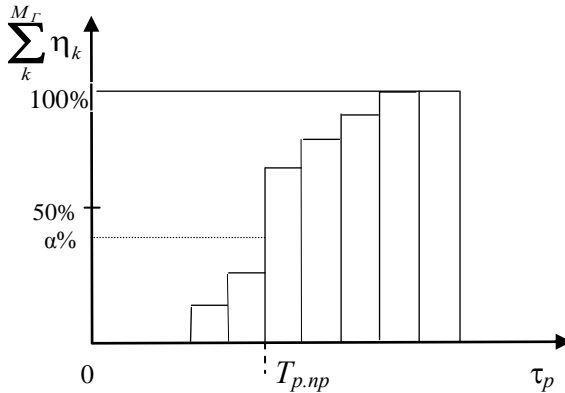


Рис. 2.1. Залежність накопиченої відносної частки ЕРЕ від значення ресурсу

Значення  $\alpha$ -відсоткового рівня може бути встановлено за умови узгодження з замовником на підставі досвіду експлуатації аналогічних систем.

Визначення призначеного ресурсу (призначеного терміну служби) виконують у такій послідовності.

1. Всі комплектуючі АЗК ЕРЕ поєднують у групи з однаковим ресурсом  $\tau_{pk}$  і визначають кількість елементів у кожній групі  $n_k(\tau_{pk})$ .

2. Визначають відносну частку елементів кожної групи (у відсотках).

$$\eta_k = \frac{n_k}{M} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

3. За заданим  $\alpha$  визначають

$$T_{p,np} = \tau_{pk},$$

де номер групи  $k$  знаходять зі співвідношення

$$\sum_{i=1}^k \eta_k \leq \alpha, \quad (2.5)$$

причому, при підсумовуванні нумерація груп елементів здійснюється у послідовності зростання ресурсу. Тут через  $k$  позначають номер групи елементів з ресурсом  $\tau_{pk}$ , для якої накопичена частка всіх елементів з меншим ресурсом менша, ніж  $\alpha$ , або дорівнює їй.

Розв'язання нерівності 2.5 зручно здійснювати в табличній або графічній формі.

*Приклад.* Припустимо, що апаратура містить 1000 ЕРЕ, які за мінімальним напрацюванням поділяються на п'ять груп (табл. 2.1). Необхідно визначити призначений ресурс апаратури при  $\alpha=20\%$ .

1. Визначимо відносну частку елементів кожної групи  $\eta_k$  і результати запишемо у стовпець 4 таблиці.

2. Визначимо накопичену частку елементів  $\sum \eta_k$  і запишемо результат у стовпець 5 таблиці.

3. Аналізуючи стовпець 5, переконаємось, що нерівність 2.5 виконується для груп 1, 2 та 3, причому, номер третьої групи є максимальним. Отже, призначений ресурс апаратури дорівнює мінімальному напрацюванню елементів 3-ї групи, тобто  $T_{p,np} = 8000$  год.

У цьому випадку мінімальне напрацювання дорівнює 8000 год, або менше за цю величину, або може мати не більше, ніж 19% ЕРЕ.

*Таблиця 2.1*

№ групи	$\tau_{pk}$ (год)	$n_k$ (шт)	$\eta_k$ (%)	$\sum \eta_k$ (%)
1	4000	50	5	5
2	6000	70	7	12
3	8000	70	7	19
4	10000	210	21	40
5	12000	600	60	100

### 2.1.2. Оцінювання призначеного ресурсу АЗК за даними про зміну визначальних параметрів ЕРЕ

Параметр потоку відмов АЗК після досягнення певного напруження має тенденцію до збільшення. Призначеним ресурсом у цьому випадку можна вважати напруження до моменту часу, коли значення параметра потоку відмов, який змінюється, досягне гранично допустимої величини  $\omega_{don}(t)$ . Тоді призначений ресурс може бути визначений шляхом розв'язання рівняння

$$\omega(t) - \omega_{don}(t) = 0. \quad (2.6)$$

Можна записати:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^{N_T} n_i \omega_i(t) + \omega_{e.p}(t), \quad (2.7)$$

де  $N_T$  – кількість типоміналів елементів з раптовими і поступовими відмовами;

$n_i$  – кількість елементів  $i$ -го типоміналу;

$\omega_i(t)$  – параметр потоку відмов елементів  $i$ -го типоміналу;

$\omega_{e.p}(t)$  – сумарне значення параметра потоку відмов елементів, які мають лише раптові відмови.

Визначають  $\omega_{e.p}(t)$  шляхом підсумовування інтенсивностей відмов окремих елементів. Функції  $\omega_i(t)$  визначають шляхом розв'язання інтегрального рівняння відновлення [5]:

$$\omega_i(t) = f_i(t) + \int_0^t f_i(t - \tau) \omega_i(\tau) d\tau, \quad (2.8)$$

де  $f_i(t)$  – щільність розподілу часу безвідмовної роботи.

Для елементів з раптовими і поступовими відмовами (елементів, що старіють) як закон розподілу часу безвідмовної роботи може бути використана суперпозиція експоненціального і зрізаного нормальних розподілів:

$$f_i(t) = c_i \lambda_i \exp(-\lambda_i t) \frac{(1-c_i) \exp\left[-\frac{(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]}{\sqrt{2\pi} \sigma_i [0,5 + \Phi_0(T_i/\sigma_i)]} \quad (2.9)$$

за умови  $t \geq 0$ ,

де  $c_i$  – коефіцієнт відносної кількості раптових і поступових відмов елементів  $i$ -го типоміналу;

$\lambda_i$  – інтенсивність відмов елементів  $i$ -го типоніміналу;

$T_i, \sigma_i$  – параметри нормального розподілу, які практично збігаються відповідно з математичним сподіванням і середнім квадратичним відхиленням (СКВ) безвідмовної роботи до поступової відмови  $i$ -го елемента ( $v=T_i/\sigma_i$ );

$$\Phi_0(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{нормована функція Лапласа.}$$

Значення  $T_i, \sigma_i$  отримують через середнє значення і СКВ визначального параметра елемента (ВПЕ) для різних моментів часу (наведено в довідниках з надійності), припускаючи, що залежність параметра від часу є лінійною, а значення ВПЕ в будь-який момент часу розподілені за нормальним законом [7]:

$$T_i = \frac{(t_{k+1} - t_k) d_i - t_{k+1} A_i(t_k) + t_k A_i(t_{k+1})}{|A_i(t_{k+1}) - A_i(t_k)|}; \quad (2.10)$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{(t_{k+1} - t_k) [0,5(\sigma_i^2(t_{k+1}) - \sigma_i^2(t_k)) T_i + t_{k+1} \sigma_i^2(t_k) - t_k \sigma_i^2(t_{k+1})]}}{|A_i(t_{k+1}) - A_i(t_k)|}, \quad (2.11)$$

де  $d_i$  – допуск на ВПЕ;

$A_i(t_k), A_i(t_{k+1})$  – середні значення ВПЕ у моменти часу  $t_k, t_{k+1}$ ;

$\sigma_i(t_k), \sigma_i(t_{k+1})$  – СКВ параметра у ті самі моменти часу.

Розглянемо методику визначення призначеного ресурсу АЗК.

Перш за все, аналізують ЕРЕ апаратури. Шляхом підсумовування інтенсивностей відмов всіх елементів, які мають тільки раптові відмови, визначають  $\omega_{e,p}(t)$ .

Для кожного з елементів, які мають як раптові, так і поступові відмови, за формулами 2.10, 2.11 визначають  $T_i, \sigma_i$ .

За відомими  $T_i, \sigma_i, \lambda_i, c_i$  відповідно до формули 2.9, для кожного елемента визначають щільність розподілу часу безвідмовної роботи  $f_i(t)$ .

Далі, за допомогою розв'язання інтегрального рівняння 2.8, визначають функцію щільності відновлення (параметр потоку відмов) кожного елемента.

Наближений розв'язок цього рівняння має вигляд [3]:

$$\omega_i(t_v) = \frac{1}{1 - 0,5h \cdot F_v} \times \left\{ f_i(t) + 0,5F_{v0} \omega_i(t_0) + h \sum_{j=1}^{v-1} F_{vj} \omega_i(t_j) \right\}, \quad (2.12)$$

де  $h$  – довжина інтервалу розбиття;

$f_i(t_v)$  – щільність розподілу часу безвідмовної роботи в момент  $t_v$ ;

$t_v = vh$ ,  $v = \overline{1, Q}$ ;  $Q$  – кількість точок поділу;

$F_{vj} = f_i(t_v - \tau_j)$  – ядро інтегрального рівняння;

$\tau_j = jh$ ,  $F_{v0} = f_i(t_v)$ .

Після визначення всіх значень  $\omega_i(t)$  знаходять функцію  $\omega(t)$  (2.9) і розв'язують рівняння (2.8). Призначений ресурс АЗК обчислюють як корінь цього рівняння.

Розглянута методика досить громіздка і, у зв'язку з необхідністю розв'язання багатьох інтегральних рівнянь чисельним методом, практично може бути реалізована тільки на ЕОМ.

Крім того, в сучасних довідниках з надійності відсутні дані для визначення  $T_i$ ,  $\sigma_i$ , тобто є дані для  $A_i(t_k)$ ,  $T_i$ ,  $\sigma_i$ , а аналогічні дані для елементів високого ступеня інтеграції також відсутні. Все це суттєво обмежує застосування методики.

### **2.1.3. Визначення показників довговічності АЗК через показники довговічності складових частин**

Припустимо, що апаратура складається з  $M$  складових частин, а граничний стан апаратури в цілому настає, коли настає граничний стан однієї або декількох складових частин. У цьому випадку можна (за аналогією з безвідмовністю) вважати, що стосовно довговічності складові частини з'єднані послідовно.

Позначимо через  $p(t)$  ймовірність настання граничного стану апаратури за час  $t$ . Оскільки граничний стан апаратури не настає, якщо у граничному стані не перебуває жодна зі складових частин, можна записати

$$p(t) = \prod_{i=1}^m p_i(t), \quad (2.13)$$

де  $p_i(t)$  – ймовірність ненастання граничного стану  $i$ -ої складової частини за час  $t$ .

Якщо відома щільність розподілу часу до настання граничного стану складової частини  $\phi_i(t)$ , то



$$p_i(t) = 1 - \int_0^t \varphi_i(\tau) d\tau$$

і щільність розподілу часу до настання граничного стану апаратури  $\varphi(t)$  визначається за формулою

$$\varphi(t) = \frac{-d \left\{ \prod_{i=1}^m \left[ 1 - \int_0^t \varphi_i(\tau) d\tau \right] \right\}}{dt}. \quad (2.14)$$

За відомою щільністю розподілу  $\varphi(t)$  можна визначити середній ресурс (термін служби) апаратури

$$T_p = \int_0^{\infty} t \varphi(t) dt = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^m p_i(t) dt \quad (2.15)$$

або  $\gamma$ -відсотковий ресурс.

Оскільки щільність розподілу  $\varphi_i(t)$  звичайно невідома, а відомі, тобто наведені в ТУ і (або) у ЕД, або середній ресурс (термін служби), або призначений ресурс (термін служби), необхідно взяти припущення про вид закону розподілу  $\varphi_i(t)$  і про співвідношення його параметрів.

Досвід експлуатації різних модифікацій електронної апаратури дозволяє зробити припущення про нормальний закон розподілу часу до настання граничного стану

$$\varphi_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ci}} e^{-\frac{(t-T_{pi})^2}{2\sigma_{ci}^2}},$$

де  $\sigma_{ci}$  – СКВ часу до настання граничного стану складової частини;

$T_{pi}$  – середній ресурс складової частини.

Тут нормуючий множник (розподіл зрізаний) виключено, оскільки  $T_{pi} \gg \sigma_{ci}$ .

Припустимо також, що коефіцієнт  $\rho = \sigma_{pi}^2 / T_{pi}$  є відомим. Керуючись досвідом експлуатації, можна вважати  $\rho = 0,1 - 0,2$ .

Послідовність визначення показників довговічності апаратури така.

Для всіх складових частин визначають

$$\sigma_{ci} = \rho \cdot T_{pi}.$$

За умови, що закони розподілу часу роботи до граничного стану складових частин відомі, а також відомий вид закону – нормальний (з параметрами  $\sigma_{ci}, T_{pi}$ ), визначають  $\varphi(t)$  за формулою

$$\varphi(t) = -\frac{d}{dt} \prod_{i=1}^m \left[ 1 - \Phi_0 \left( \frac{t - T_{pi}}{\sigma_{ci}} \right) \right]. \quad (2.16)$$

Далі, за формулою 2.15, визначають середній ресурс апаратури в цілому.

#### **2.1.4. Розрахунок похибок**

В процесі зношення і старіння АЗК відбувається поступова зміна їхніх параметрів, в результаті чого у певний момент часу частина параметрів може вийти за межі допуску. Оскільки в технічних умовах на більшість покупних виробів, з яких складається АЗК, наведена деяка інформація про припустимі зміни їхніх параметрів внаслідок зношення й старіння, є можливість на етапі розробки АЗК (методом розрахунку) визначити час виходу параметрів АЗК за межі допуску і таким чином прогнозувати довговічність апаратури, яка розробляється.

Розрахунок показників довговічності в цьому випадку виконують поблочно, тобто окремо для кожного функціонального пристрою (ФП) АЗК, який не підлягає регулюванню в процесі експлуатації.

Для конкретного ФП складають функції залежності визначальних параметрів від врахованих параметрів, тобто від параметрів комплектуючих виробів, параметрів вхідних сигналів, навантаження джерел живлення тощо.

З урахуванням цього можна записати:

$$Q = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.17)$$

де  $Q$  – визначальний параметр ФП;

$q_i$  –  $i$ -ий врахований параметр;

$n$  – кількість врахованих параметрів.

Використавши розкладення функції 2.17 у ряд Тейлора і обмежившись двома першими членами, визначають коефіцієнти  $A_i$  впливу відносного приросту  $i$ -го врахованого параметра  $Q$  за формулою

$$A_i = \left( \frac{\partial Q}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{Q} \right)_0. \quad (2.18)$$

Далі, на підставі даних ТУ, для кожного з врахованих параметрів комплектуючих виробів необхідно скласти функції залежності врахованого параметра від напрацювання і від календарного часу (часу старіння). Замість значення параметра зручніше обчислювати відхилення параметра від номінального значення. Ці залежності можуть бути подані у вигляді

$$\delta q_{ni} = a_i + b_i t_n; \quad (2.19)$$

$$\delta q_{ci} = c_i + d_i t_c, \quad (2.20)$$

де  $\delta q_{ni}$ ,  $\delta q_{ci}$  – відповідно відносні відхилення врахованого параметра внаслідок напрацювання і старіння;

$a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – сталі коефіцієнти, які визначають на підставі даних ТУ (для більшості покупних виробів  $a = 0$ ,  $c = 0$ );

$t_n$ ,  $t_c$  – відповідно поточне напрацювання і час старіння АЗК.

Для виконання розрахунку необхідно також мати значення напрацювання за один рік експлуатації АЗК. Приблизне значення поточного напрацювання можна записати у вигляді

$$t_n = \frac{T_{pn}}{T_{mn}} t_m, \quad (2.21)$$

де:  $T_{pn}$  – середній (призначений) ресурс;

$T_{mn}$  – середній (призначений) термін служби;

$t_m$  – термін служби.

Тоді, за умови нормального закону розподілу врахованих параметрів і їхньої взаємної незалежності, відносна похибка  $\delta Q$  ФП за параметром  $Q$  визначиться за формулою:

$$\delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \left[ \left( a_i + b_i \frac{T_{pn}}{T_{mn}} t_m \right)^2 + (c_i + d_i t_m)^2 \right]} + \delta_{\Sigma \text{ін}}^2, \quad (2.22)$$

де  $\delta_{\Sigma \text{ін}}$  – сума інших похибок ФП (виробничих, температурних тощо).

Шляхом розв'язання рівняння 2.22 відносно  $t_m$  при  $\delta Q = \delta Q_{don}$  ( $\delta Q_{don}$  – допустима похибка ФП) отримують допустимий термін служби  $t_{m\ don}$  ФП, протягом якого його похибка перебуває в межах допуску.

Аналогічно можна визначити допустимі терміни служби решти нерегульованих ФП АЗК, з яких вибирають найменше значення  $t_{m\ don}$ , яке беруть як призначений термін служби АЗК.

Таким чином, на етапі розробки є можливість визначення довговічності (призначеного терміну служби) АЗК шляхом розрахунку за критерієм збережності характеристик точності у межах допуску, що еквівалентно виконанню вимог до інструментальної достовірності контролю. Проте, точність цих розрахунків невисока внаслідок недостатньої точності вихідних даних в ТУ на покупні вироби, що пояснюється труднощами отримання інформації при великих значеннях напруження і часу зберігання після тривалого часу випробувань.

### **2.1.5. *Натурні випробування***

Крім розглянутих методів розрахункового оцінювання показників довговічності АЗК на етапі розробки, проводять випробування апаратури на довговічність. Такі випробування доцільно проводити лише після виготовлення необхідної кількості дослідних зразків, тобто в процесі проведення попередніх або (і) державних випробувань.

У програмі випробувань на довговічність наводять критерії граничних станів апаратури. Випробування на довговічність автоматичних засобів контролю доцільно поєднувати з випробуваннями на безвідмовність.

Випробування проводять циклічно, причому, в кожному циклі апаратуру послідовно випробовують (за допомогою різних видів випробувань) на характер впливу зовнішніх чинників. Види випробувань у циклі та тривалість циклу визначають заданими в ТЗ умовами застосування апаратури. Передбачаються такі види випробувань: випробування на вплив механічних навантажень, підвищеної вологості, низької температури, високої температури. Близько половини часу в циклі відводять на випробування в нормальних умо-

вах. Режими випробувань у циклі визначають ТУ на автоматичні засоби контролю.

Перед початком кожного виду випробувань проводять перевірку апаратури в нормальних кліматичних умовах в режимі самоконтролю, після чого апаратура функціонує в умовах впливу відповідного кліматичного чинника, причому, періодично проводять перевірки в режимі самоконтролю. В процесі випробувань здійснюється облік напрацювання і відмов. Після відновлення працездатності випробування продовжують. Випробування кожного зразка припиняють після настання його граничного стану.

Припустимо, що випробуванням підлягають  $N$  зразків АЗК і напрацювання їх до граничного стану склав відповідно  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_N$  годин. Оцінка середнього ресурсу АЗК визначається за такою формулою

$$\hat{T}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i. \quad (2.23)$$

Оцінка середнього терміну служби  $\hat{T}_m$  визначається за формулою

$$\hat{T}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (2.24)$$

де  $\tau_i$  – календарний термін випробувань  $i$ -го зразка до настання граничного стану.

При випробуваннях на термін служби напрацювання зразка протягом циклу випробувань повинно відповідати реальному експлуатаційному напрацюванню за той самий період.

Для отримання оцінки ресурсу  $T_p$  і терміну служби  $T_m$  з потрібною точністю необхідно випробувати значну кількість зразків; мінімальна кількість ( $N$ ) для більш-менш точної оцінки дорівнює 7-10. Оскільки випробування на довговічність вельми тривалі і вимагають для проведення порівняно великої кількості дорогих дослідних зразків, для АЗК практично не застосовують натурні випробування на довговічність.

## **2.2. Методи оцінювання показників довговічності АЗК на етапі експлуатації**

### **2.2.1. Визначення показників довговічності АЗК за статистичними даними експлуатації**

Випробування на довговічність АЗК на етапі серійного виробництва звичайно не передбачаються. Оцінювання показників довговічності на етапі експлуатації АЗК базується на системі збору і обробки інформації про надійність.

Якщо для АЗК в документації (ТЗ, ТУ) задано вимоги у вигляді середнього ресурсу і середнього терміну служби, то експлуатаційна документація встановлює критерії граничного стану. Припустимо, що для якоїсь сукупності з  $N$  зразків, що експлуатуються, маємо інформацію про моменти настання граничного стану кожного зразка, яка зафіксована у тому чи іншому документі, наприклад, у формулярі, акті списання, картці обліку тощо. Отже, маємо інформацію про тривалість роботи зразка до настання граничного стану, тобто відомі реалізації випадкової величини – ресурсу або терміну служби  $t_i$ ,  $\tau_i$ . У цьому випадку оцінка середнього ресурсу (терміну служби) визначається за формулами 2.23, 2.24.

Точність оцінки тим вища, чим більше є спостережень, тобто, чим більше  $N$ . Ця оцінка може бути використана для визначення відповідності апаратури заданим вимогам.

Якщо в документації (ТЗ, ТУ) вимоги до довговічності задані у вигляді призначеного ресурсу (терміну служби), можлива інша методика визначення довговічності за даними експлуатації.

За наявною інформацією про відмови апаратури і час їхнього виникнення можна визначити залежність параметра потоку відмов АЗК від часу, і шляхом порівняння з припустимою межею знайти значення призначеного ресурсу (терміну служби). Послідовність визначення така.

Вибирають максимальне значення напрацювання (часу експлуатації) серед  $N$  зразків АЗК, про які є інформація про відмови –  $t_{\max}$ .

Діапазон значень напрацювання ( $0 - t_{\max}$ ) поділяють на  $H$  інтервалів і визначають ширину кожного інтервалу  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{t_{\max}}{H}. \quad (2.25)$$

Для кожного інтервалу встановлюють межі:

1-й інтервал –  $0 \div \Delta$ ;

2-й інтервал –  $\Delta \div 2\Delta$ ;

.....  
 $j$ -й інтервал –  $(j - 1)\Delta \div j\Delta$ ;

.....  
 $H$ -й інтервал –  $(H - 1)\Delta \div H\Delta$

і обчислюють значення параметра потоку відмов

$$\omega_e(t_{j\text{сер}}) = \frac{I_j}{\Delta L_j}, \quad (2.26)$$

де  $L_j$  – кількість зразків, які експлуатуються протягом  $j$ -го інтервалу;

$I_j$  – кількість відмов, зафіксованих для даного інтервалу;

$t_{j\text{сер}}$  – середнє значення напрацювання у  $j$ -му інтервалі:

$$t_{j\text{сер}} = \Delta(j - 0,5). \quad (2.27)$$

Вигляд емпіричної залежності  $\omega_e(t)$  показано на рис. 2.2.

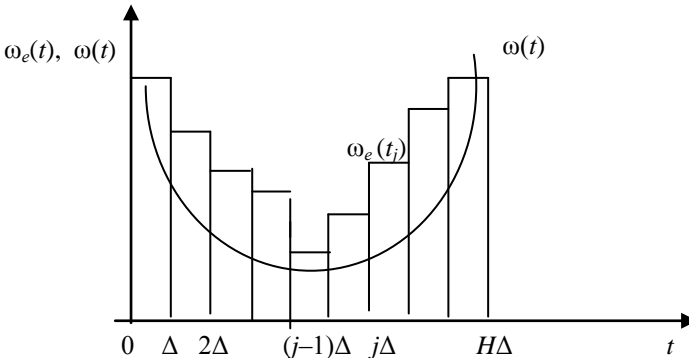


Рис. 2.2. Емпірична залежність  $\omega_e(t)$

Емпірична залежність  $\omega_e(t)$  апроксимується поліномом  $m$ -го ступеня

$$\omega(t, a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{k=0}^m a_k t^k \quad (2.28)$$

методом найменших квадратів, за яким вимога найкращого узгодження кривої  $\omega(t, a_0, a_1, \dots, a_m)$  і дискретних значень  $\omega_e(t_j)$  полягає в тому, щоб сума квадратів відхилень  $\omega_e(t_j)$  від апроксимуючого полінома становила мінімум, тобто

$$\sum_{j=1}^H [\omega_e(t_j) - \omega(t_j, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min. \quad (2.29)$$

Коефіцієнти полінома  $a_0, \dots, a_m$ , які перетворюють ліву частину виразу на мінімум, знаходять шляхом розв'язання системи з  $m + 1$  рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^H \omega_e(t_j) t_j^m - \sum_{k=0}^m a_k \sum_{j=1}^H t_j^{k+m} &= 0; \\ \sum_{j=1}^H \omega_e(t_j) t_j^{m-1} - \sum_{k=0}^m a_k \sum_{j=1}^H t_j^{k+m-1} &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^H \omega_e(t_j) t_j - \sum_{k=0}^m a_k \sum_{j=1}^H t_j^{k+m-m} &= 0. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Значення призначеного ресурсу (терміну служби) після відшукування  $a_0, \dots, a_m$  визначають шляхом розв'язання відносно  $t$  рівняння

$$\sum_{k=0}^m a_k t^k - \omega_{don} = 0, \quad (2.31)$$

де  $\omega_{don}$  – допустиме значення параметра потоку відмов АЗК.

### 2.2.2. Економічний аналіз

Зі збільшенням календарного часу експлуатації і (або) напруження АЗК, внаслідок зношення і старіння, може суттєво збільшитись параметр потоку відмов (відновлень)  $\omega(t)$  і (або) параметр потоку самоусувних відмов (відмов перебійного характеру)  $\lambda(t)$ . Це призводить до суттєвого збільшення витрат на відновлення АЗК або до втрат, пов'язаних з виникненням самоусувних відмов.



Як економічний критерій граничного стану звичайно використовують критерій мінімуму питомих витрат, пов'язаних з придбанням і експлуатацією об'єкта [7]. Оскільки звичайно апріорні дані про процеси зношення і старіння АЗК або відсутні, або недостатньо достовірні, використання економічного критерію граничного стану, який базується на апріорних даних, не завжди можливе. У даному випадку можна вважати доцільним використання економічного критерію граничного стану, який базується на апостеріорних даних, тобто на даних про фактичний стан об'єкта.

Сумарні питомі витрати  $B_n(t)$  визначають таким чином:

$$B_n(t) = C_{en} + \frac{1}{t} [C_z + C_e \cdot n(t) + C_{e.c} \cdot m(t)], \quad (2.32)$$

де  $C_{en}$  – стала складова питомих експлуатаційних витрат, яка складається з основної зарплати обслуговуючого персоналу, вартості електроенергії, витратних матеріалів тощо;

$C_z$  – витрати на придбання АЗК (вартість зразка);

$C_e$  – середні витрати на одне відновлення АЗК;

$C_{e.c}$  – середні витрати на одну самоусувну відмову АЗК;

$n(t)$  – сумарна кількість відмов (відновлень) АЗК за час  $t$ ;

$m(t)$  – сумарна кількість самоусувних відмов АЗК за час  $t$ .

Функція  $B_n(t)$  досягає мінімуму за умови, коли її похідна дорівнює нулю.

Припустимо, що функції  $n(t)$ ,  $m(t)$  неперервні, можуть бути диференційовані і є функціями залежності математичних сподівань кількості відмов від часу.

Продиференціювавши функцію 2.32 по аргументу  $t$ , враховуючи, що  $m'(t) = \lambda(t)$ ,  $n'(t) = \omega(t)$ , і прирівнявши похідну до нуля, отримаємо рівняння для визначення значення  $t$ , для якого сумарні питомі витрати мінімальні:

$$C_e [t\omega(t) - n(t)] + C_{e.c} [t\lambda(t) - m(t)] = C_z. \quad (2.33)$$

На підставі рівняння 2.33 можна сформулювати вирішальне правило для визначення настання граничного стану АЗК за економічним критерієм. Граничний стан вважається таким, що настав, якщо виконується нерівність

$$C_e \omega(t) - C_{e.c} \lambda(t) \geq \frac{1}{t} [C_3 + C_e n(t) + C_{e.c} m(t)], \quad (2.34)$$

тобто експлуатація зразка АЗК повинна припинитись тоді, коли починається збільшення сумарних питомих витрат.

Якщо  $\omega(t) \neq const$ ,  $\lambda(t) = const$ , то нерівність 2.34 набуває вигляду:

$$\omega(t) \geq \frac{1}{t} \left[ \frac{C_3}{C_e} + n(t) \right], \quad (2.35)$$

а якщо  $\omega(t) = const$ ,  $\lambda(t) \neq const$ , то такого вигляду:

$$\lambda(t) \geq \frac{1}{t} \left[ \frac{C_3}{C_{e.c}} + m(t) \right]. \quad (2.36)$$

Для практичного застосування нерівностей 2.34–2.36 необхідно мати значення параметрів  $\omega(t)$  і  $\lambda(t)$ . Решта параметрів є величинами відомими, якщо організовано їх облік в процесі експлуатації АЗК і якщо припустити, що  $n(t)$  дорівнює фактичній кількості відмов АЗК, а  $m(t)$  – фактичній кількості самоусувних відмов.

Найпростішим методом отримання величин  $\omega(t)$  і  $\lambda(t)$  за апостеріорними даними є визначення їхніх оцінок  $\omega^*(t)$  і  $\lambda^*(t)$  на деякому інтервалі  $\Delta t$ , який примикає до точки  $t$ , за такими формулами:

$$\omega^*(t) = \frac{n\Delta t}{\Delta t}; \quad (2.37)$$

$$\lambda^*(t) = \frac{m\Delta t}{\Delta t}, \quad (2.38)$$

де  $n\Delta t$ ,  $m\Delta t$  – відповідно кількість відмов (відновлень) і кількість самоусувних відмов на інтервалі часу  $\Delta t$ .

У цьому випадку виникає похибка  $\Delta t/2$ , яка може бути врахована у вигляді поправки (тобто з протилежним знаком до напрацювання  $t$  в нерівностях 2.34 – 2.36).

Приклад.

Розглянемо АЗК, для якого  $C_3=100000$  грн,  $C_e=200$  грн,  $C_{e.c}=10$  грн,  $t=15000$  год,  $n(t)=150$ ,  $m(t)=50$ , причому, до 15000 год  $\omega(t) = const$ ,  $\lambda(t) = const$ . Протягом останнього інтервалу часу параметр потоку відмов АЗК суттєво збільшився:  $n\Delta t = 75$ ,  $m\Delta t = 10$ .

Визначити величину напрацювання, після якого настає граничний стан АЗК.

За формулами 2.37, 2.38 обчислюємо:

$$\omega^*(t) = 75/1000 = 0,075 \text{ 1/год}; \lambda^*(t) = 10/1000 = 0,01 \text{ 1/год.}$$

Обчислюємо ліву частину нерівності 2.34:

$$C_e \omega^*(t) + C_{e.c} \lambda^*(t) = 200 \cdot 0,075 + 10 \cdot 0,01 = 15,1 \text{ грн/год.}$$

Враховуючи поправку  $\Delta t/2$  до напрацювання  $t$ , обчислюємо праву частину нерівності:

$$\frac{1}{t} [C_s + C_e n(t) + C_{e.c} m(t)] = (100000 + 200 \cdot 150 + 10 \cdot 50) / (15000 + 1000 \cdot 0,5) \approx 8,4 \text{ грн/год.}$$

Нерівність виконується, що свідчить про настання граничного стану АЗК після напрацювання приблизно 15500 годин.

### Методичні вказівки

Вивчаючи цю главу, слід зосередити увагу на тому, що вимоги до довговічності АЗК задаються технічним завданням і технічними вимогами – у вигляді вимог до її кількісних показників – призначеного (середнього) ресурсу і призначеного (середнього) терміну служби.

Оцінювання показників довговічності АЗК проводять поетапно, причому, для кожного етапу існує своя методика.

При оцінюванні довговічності виріб розглядають як набір не пов'язаних між собою комплектуючих електрорадіоелементів. Слід зазначити, що при оцінюванні показників довговічності АЗК за мінімальним значенням показників довговічності ЕРЕ їх мінімальне напрацювання і термін служби не повинні бути меншими за відповідні показники довговічності всієї апаратури. На стадії розробки є можливість визначення довговічності АЗК розрахунковим шляхом за різними методиками, в тому числі за критерієм збереженості характеристик точності в межах допуску, що еквівалентно виконанню вимог до інструментальної достовірності контролю.

Після виготовлення необхідної кількості дослідних зразків в процесі проведення випробувань на довговічність їх доцільно по-

еднувати з випробуваннями на безвідмовність. Випробування проводять циклічно, причому, в кожному циклі апаратуру послідовно випробовують на вплив зовнішніх чинників.

Слід звернути увагу на те, що випробування на довговічність АЗК на етапі серійного виробництва, як правило, не передбачаються. Оцінка ж показників довговічності на етапі експлуатації АЗК здійснюється за статистичними даними експлуатації, а також за результатами економічного аналізу показників, які характеризують витрати на відновлення АЗК або пов'язані з виникненням самоусувних відмов.

### **Запитання для самоперевірки**

1. В яких документах задаються вимоги до довговічності АЗК?
2. На яких етапах розробки здійснюється кількісне оцінювання довговічності АЗК?
3. Назвіть показники довговічності ЕРЕ, оцінка яких на етапі розробки АЗК передбачена нормативно-технічною документацією.
4. Викладіть методику оцінювання показників довговічності АЗК за мінімальним значенням довговічності ЕРЕ.
5. У чому сутність методики оцінювання показників довговічності АЗК за  $\alpha$ -відсотковою витратою ресурсу (терміну служби) елементів?
6. Опишіть методику оцінки призначеного ресурсу АЗК за даними про зміну визначальних параметрів ЕРЕ.
7. Викладіть методику визначення показників достовірності АЗК через показники довговічності їх складових частин.
8. Яким чином виконується розрахунок похибок АЗК?
9. Як визначити термін служби АЗК?
10. Яким чином і з якою метою проводять випробування на довговічність АЗК?
11. Викладіть методику оцінювання показників довговічності АЗК за статистичними даними експлуатації.
12. Яким чином виконується економічний аналіз оцінювання показників довговічності АЗК на етапі експлуатації?

## **ГЛАВА 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АЗК**

### **3.1. Методи забезпечення довговічності АЗК на етапі розробки**

#### ***3.1.1. Вибір елементної бази***

Забезпечення заданих показників довговічності АЗК закладається вже на ранніх етапах проектування. Для цього виконують відповідні розрахунки конструкції автоматичних засобів контролю на міцність і зношення, вибирають конструкційні матеріали, гальванічні та лакофарбові покриття, що забезпечує потрібні характеристики довговічності.

Сучасні АЗК містять десятки тисяч електрорадіоелементів, які є також досить складними виробами. Довговічність АЗК значною мірою залежить від довговічності комплектуючих ЕРЕ. Тому вельми важливим для забезпечення довговічності АЗК є вибір елементної бази, застосування елементів з відповідними показниками довговічності.

З точки зору забезпечення високої довговічності бажано вибирати ЕРЕ (за інших однакових умов) з максимальним значенням показників довговічності ( $\gamma$ -відсоткового ресурсу, мінімального терміну служби, мінімального напрацювання). Проте, це не завжди виправдано з економічної точки зору.

Тому при виборі ЕРЕ слід керуватись правилом, яке впливає з вимог НТД: значення мінімального напрацювання і мінімального терміну служби ЕРЕ повинні бути не меншими від значень призначеного ресурсу і, відповідно, призначеного терміну служби апаратури, яку розробляють. У випадку, коли показники довговічності задані середнім ресурсом і середнім терміном служби, ця вимога може бути сформульована з меншим ступенем обов'язковості: мінімальне напрацювання і мінімальний термін служби звичайно мають бути не меншими середнього ресурсу і, відповідно, середнього терміну служби АЗК.

Якщо ці рекомендації не можуть бути виконані через відсутність потрібних електрорадіоелементів, то слід передбачити комплектування запасними елементами і (або) примусову заміну, а також забезпечити можливість заміни під час експлуатації за технічним станом.

### 3.1.2. Комплектування запасними елементами

Основне призначення комплекту запасних частин апаратури ЗІП (запасні інструменти і пристрої) – підтримання працездатності і забезпечення потрібних показників ремонтпридатності (підвищення коефіцієнта готовності, зменшення часу простоїв апаратури). Визначення номенклатури і кількості запасних частин проводять звичайно, виходячи з допустимих значень середнього часу простоїв або середнього часу відновлення. Комплектування запасними елементами (додатково до запасних елементів, які забезпечують працездатність) може також сприяти забезпеченню потрібних показників довговічності АЗК.

При заміні елемента (складової частини) на працездатний зі складу ЗІП ресурс цього елемента ніби збільшується, оскільки на працювання елемента, який замінили, починається практично з нуля (під час експлуатації у складі ЗІП ресурс елементів не витрачається). Це не стосується терміну служби, оскільки процеси старіння у складі ЗІП відбуваються практично так само, як і процеси старіння у складі апаратури.

Якщо у складі комплекту запасних частин апаратури знаходяться  $n_3$  однакових елементів, то при заміні такого елемента після досягнення ним призначеного ресурсу (мінімального напрацювання), можна вважати, що елемент має призначений ресурс (мінімальне напрацювання)  $(n_3+1)T_{pn}$ , тобто “еквівалентний” призначений ресурс в  $n_3+1$  разів більший.

Виходячи з цього, можна сформулювати принцип визначення номенклатури і кількості запасних елементів, додатково призначених у ЗІП для забезпечення потрібної довговічності (за напрацюванням).

Якщо результати оцінювання показників довговічності, проведеного на етапі розробки, показали, що розрахункове значення показника довговічності менше потрібного, то до складу ЗІП призначають додатково по  $n_3$  елементів з групи з мінімальним значенням ресурсу. Приблизно  $n_3$  визначається співвідношенням

$$T_{pne}(n_3+1) = T_{pnc},$$

де  $T_{pne}$  – призначений ресурс елемента;

$T_{pnc}$  – призначений ресурс системи.

Для цих елементів значення призначеного ресурсу (мінімального напруцювання) приймають в  $n_3+1$  разів більшим, після чого знову проводять оцінювання показників довговічності. Якщо і в цьому випадку вимоги до довговічності не виконуються, до ЗІП, з тих самих міркувань, додатково призначають елементи другої групи (у послідовності збільшення значень ресурсу) і знову проводять оцінювання довговічності. Процес продовжується доти, доки вимоги до довговічності не будуть виконані.

В експлуатаційній документації наведено послідовність примусової заміни елементів, додатково призначених до ЗІП. Крім того, слід враховувати, що в умовах експлуатації не всі елементи можна замінити, в такому випадку до складу ЗІП включають складові частини (блоки, субблоки), які містять такі елементи.

### ***3.1.3. Примусова заміна елементів***

Якщо АЗК не відповідає вимогам до довговічності щодо показників, які характеризують календарну тривалість експлуатації, призначення елементів з обмеженим терміном служби не має сенсу.

Забезпечення довговічності у цьому випадку може здійснюватись шляхом примусових заміни елементів за календарним принципом новими елементами, які поставляють за спеціальним замовленням. В експлуатаційній документації у такому випадку повинні бути обумовлені термін, послідовність та технологія заміни елементів.

Послідовність призначення примусової заміни елементів така. Якщо в результаті оцінювання довговічності в процесі розробки не виконуються вимоги до терміну служби, то призначають примусову заміну елементів першої групи (з мінімальними значеннями призначених термінів служби) у терміни, які відповідають цим значенням. Після цього проводять оцінювання призначеного терміну служби без урахування цих елементів (при заміні їхній термін служби можна вважати достатньо великим).

Якщо і в цьому випадку вимоги до терміну служби не виконуються, то призначають заміну елементів другої, третьої і т.д. групи доти, доки розрахований показник довговічності не буде відповідати потрібному.

### 3.1.4. Періодичне регулювання

Одним з основних методів забезпечення заданих показників довговічності АЗК є періодична перевірка й регулювання визначальних параметрів апаратури в процесі експлуатації з метою підтримання її характеристик в межах встановлених норм. Для цього потрібно визначити обсяг і періодичність перевірок АЗК (за необхідністю – з одночасним регулюванням).

Обсяг перевірок АЗК визначають в процесі розрахунку похибок. Якщо якийсь параметр апаратури зберігає необхідні характеристики протягом заданого ресурсу і заданого терміну служби, то за цим параметром апаратуру в процесі експлуатації не перевіряють. В іншому разі проводять відповідну перевірку апаратури і регулювання її параметрів. Таким чином визначають перелік параметрів, які підлягають перевірці й регулюванню під час експлуатації.

Періодичність перевірки параметрів АЗК в процесі експлуатації можна визначити, скориставшись співвідношеннями, наведеними в розділі 2.1.4. Підставивши у формулу 2.22 замість  $t_m$  період перевірки  $T_k$  і врахувавши похибку  $\delta_k$  вимірювання параметра в процесі перевірки, отримаємо:

$$\delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \left[ \left( a_i + b_i \frac{T_{pn}}{T_{Tn}} T_k \right)^2 + (c_i + d_i T_k)^2 \right]} + \delta_{\Sigma_{in}}^2 + \delta_k^2. \quad (3.1)$$

В наведеній формулі позначення відповідають позначенням формули 2.22.

Розв'язавши рівняння 3.1 відносно  $T_k$  при  $\delta Q = \delta Q_{don}$ , визначимо періодичність  $T_k$  перевірки і регулювання АЗК по кожному з параметрів. Результати слід округлити до меншої цілої кількості років.

Таким чином, на етапі розробки АЗК є можливість визначення періодичності перевірки й регулювання апаратури під час експлуатації за критерієм збережності характеристик точності в межах встановлених допусків. Періодичне регулювання параметрів апаратури дозволяє суттєво підвищити довговічність АЗК.



### **3.2. Методи забезпечення й підвищення довговічності на етапі експлуатації**

Експлуатація являє собою стадію життєвого циклу виробу, під час якої реалізується, підтримується і відновлюється його якість [2].

Організація експлуатації АЗК має суттєве значення для забезпечення безвідмовності й довговічності апаратури. В процесі експлуатації планують і реалізують заходи, спрямовані на забезпечення технічно грамотного використання апаратури, підтримування її в справному стані і постійній готовності до застосування. Вимоги до виконання цих заходів і послідовність їх виконання формують і вносять в експлуатаційну документацію ще на стадії розробки АЗК. Ці вимоги і їх послідовність можуть уточнюватись і коригуватись на підставі накопиченого досвіду експлуатації апаратури.

До заходів, спрямованих на запобігання зниження рівня надійності (безвідмовності і довговічності) і безпеки застосування АЗК, належать: дотримання заданих умов і режимів експлуатації; своєчасне і якісне технічне обслуговування, до якого входить контроль технічного стану апаратури (також і інструментальний); прогнозування відмов; проведення робіт для попередження відмов елементів і пристроїв АЗК, які найбільш навантажені, зношуються або старіють (кабелі, перфоратори, елементи комутаційних пристроїв тощо); проведення поточного ремонту з подальшим технічним обслуговуванням; контроль якості виконання робіт з відновлення АЗК і з виконання доробок. Сюди також входять заходи для забезпечення справності і готовності апаратури до застосування після визначених термінів зберігання (чекання), забезпечення належної технічної підготовки обслуговуючого персоналу і якості виконуваних ним робіт, вдосконалення процесу експлуатації.

Основною умовою забезпечення потрібної довговічності АЗК на етапі експлуатації є точне і неухильне виконання вимог експлуатаційної документації та проведення призначених нею заходів у повному обсязі, якісно і з дотриманням зазначених термінів.

#### ***3.2.1. Зменшення періодичності технічного обслуговування***

Зі збільшенням напрацювання АЗК і календарної тривалості експлуатації може суттєво збільшитись параметр потоку відмов

апаратури. Внаслідок цього періодичність технічного обслуговування, зазначена в технічній документації на АЗК, може виявитись недостатньою для забезпечення потрібної надійності (безвідмовності і довговічності), маючи занадто тривалі періоди.

Важливим видом поточного технічного обслуговування АЗК є самоконтроль апаратури, призначений для своєчасного виявлення відмов, які виникають. Якщо частота проведення самоконтролю недостатня для своєчасного виявлення відмов АЗК, це знижує достовірність контролю виробу. Занадто велика частота самоконтролю збільшує витрати на проведення самоконтролю.

В АЗК, які застосовують за призначенням, можна виділити такі стани апаратури:

- 1 – апаратура працездатна і функціонує в режимі контролю;
- 2 – апаратура непрацездатна і функціонує в режимі контролю;
- 3 – апаратура працездатна і функціонує в режимі самоконтролю;
- 4 – апаратура непрацездатна і функціонує в режимі самоконтролю;
- 5 – апаратура перебуває на відновленні.

Оптимальний за критерієм максимуму ймовірності третього стану період самоконтролю  $T_{n,omt}$  визначається за формулою

$$T_{n.o.o} \approx \sqrt{\frac{2T_c}{\omega_1}}, \quad (3.2)$$

де  $T_c$  – середня тривалість самоконтролю;

$\omega_1$  – параметр потоку прихованих відмов, тобто відмов, які можна виявити лише в процесі самоконтролю.

Очевидно, що, якщо в процесі експлуатації суттєво збільшиться кількість прихованих відмов, то період самоконтролю потрібно зменшити. Тому доцільно до кінця терміну служби (ресурсу) оцінити значення  $\omega_1$ , після чого за формулою 3.2 перевірити достатність наведеного в експлуатаційній документації періоду самоконтролю АЗК і, за необхідності, зменшити його.

### **3.2.2. Організація робіт для продовження ресурсу (терміну служби)**

Продовження ресурсу і (або) терміну служби АЗК полягає у встановленні, після досягнення призначених показників, нових їх-

ніх значень і отриманні (оформленні) дозволу на експлуатацію АЗК на цей період. Питання організації й послідовності продовження ресурсу і терміну служби регламентує нормативно-технічна документація.

Продовження ресурсу може здійснюватись або для всього парку виробів, що експлуатуються, або для деякої сукупності зразків (наприклад, одного року випуску), або окремо для кожного зразка.

Визнання дійсними призначених показників АЗК доцільно визначати індивідуально по кожному зразку з проведенням технічного огляду зразка.

Настання граничного стану (з ймовірністю, яка приблизно дорівнює одиниці) в межах ресурсу (терміну служби) не відбувається, що забезпечує конструкція АЗК. Слід зазначити, що для таких складних технічних систем, як АЗК, критерії і ознаки граничного стану досить складні і громіздкі (див. розділ 1.4), і в процесі штатної експлуатації, куди входить технічне обслуговування, настання граничного стану не завжди може бути зафіксовано без проведення спеціальних робіт, без яких також не завжди можливо прогнозування настання граничного стану.

Тому одним з основних заходів для продовження терміну служби (ресурсу) АЗК є технічний огляд, в процесі якого отримують інформацію, необхідну для прийняття рішення про продовження ресурсу або про припинення експлуатації зразка.

Технічний огляд доцільно проводити одночасно з технічним обслуговуванням один раз на рік. Починати проведення огляду бажано не пізніше, ніж за три-чотири роки до закінчення ресурсу (терміну служби), що дозволяє використати статистичні дані для прогнозування. В процесі технічного огляду має бути отримана вичерпна інформація про технічний стан зразка, необхідна для обґрунтованого прийняття рішення про продовження ресурсу (терміну служби). На підставі інформації про технічний стан зразка на момент огляду, визначають, чи настав граничний стан, і на підставі цієї ж інформації, з урахуванням попередніх технічних оглядів, визначають можливість експлуатації до наступного огляду, тобто прогнозують технічний стан зразка на період до наступного технічного огляду.

Послідовність проведення технічного огляду визначається відповідно до критеріїв граничного стану АЗК і параметрів, які характеризують їхній технічний стан.

Технічний огляд кожного зразка проводять одночасно з щорічним технічним обслуговуванням.

Технічний огляд (обов'язково – кожного зразка) і щорічне технічне обслуговування виконує персонал експлуатуючих організацій з залученням, за необхідності, фахівців підприємства-розробника і підприємства-виробника. Методика виконання технічного огляду має бути наведена в експлуатаційній документації.

Під час технічного огляду, додатково до робіт в обсязі технічного обслуговування, здійснюють такі заходи:

- контроль параметрів безпеки, які не перевіряються в процесі техобслуговування;
- контроль додаткових параметрів, які впливають на інструментальну достовірність контролю;
- багаторазове проведення самоконтролю з фіксацією кількості перебоїв;
- оцінювання за системою балів якісних ознак технічного стану зразка (додаткових параметрів, які визначають експертним шляхом).

Конкретний зміст заходів, перелік параметрів та технологія робіт, які виконують додатково під час технічного огляду, визначаються типом АЗК.

Всю інформацію, яку отримано в процесі огляду (перфокарти самоконтролю або інші носії інформації про результати самоконтролю), а також перелік відмов за минулий період надсилають у центр прогнозування і прийняття рішень (ЦП), де зосереджені: база даних з експлуатації АЗК, технічні засоби прогнозування та програмне забезпечення. Такий центр може бути створений на підприємстві-розробнику.

Рішення про продовження терміну служби зразка приймають спеціалісти центру прогнозування таким чином.

1. Якщо за даними технічного огляду за останній рік хоча б один з параметрів, зазначених в розділі 1.4, крім  $\omega(t)$ , вийшов за допустимі межі, то приймають рішення про припинення експлуатації зразка і проведення середнього ремонту. Це не стосується параметрів безпеки та інструментальної достовірності контролю, вихід яких за допустимі межі може бути усунено шляхом поточного ремонту або регулювання під час обслуговування.

2. Якщо рішення про припинення експлуатації не прийнято (параметри знаходяться в допустимих межах), то проводять прогнозування значень параметрів на наступний рік за методикою, викладеною у главі 4. Прогнозування здійснюється за всіма параметрами на підставі наявної інформації про результати технічного огляду за останній і попередні роки (від трьох до п'яти років). У главі 4 всі параметри, які визначають технічний стан, називаються параметрами самоконтролю.

3. Якщо прогнозовані значення всіх параметрів перебувають в допустимих межах, то приймають рішення про продовження терміну служби на один рік.

Якщо значення  $\omega(t)$  перебуває за допустимими межами, а решта прогнозованих значень параметрів – в межах допуску, то приймають рішення про продовження терміну служби на один рік навіть за умови можливого зниження безвідмовності.

У випадку, якщо приймається рішення про припинення експлуатації зразка, то на підставі наявних даних про технічний стан зразка визначають його складові частини, стан яких призводить або може призвести до граничного стану зразка.

Про прийняття рішення стосовно можливості продовження експлуатації зразка АЗК і необхідності середнього ремонту повідомляють експлуатуючу організацію, куди також надсилають перелік складових частин, стан яких призводить або може призвести до граничного стану зразка і які в першу чергу підлягають заміні під час середнього ремонту. Методику визначення таких складових частин наведено у главі 4.

Важливим видом робіт у комплексі заходів для продовження терміну служби АЗК є середній ремонт.

Середній ремонт виконується для часткового відновлення ресурсу виробів. Якщо за результатами технічного огляду зразка АЗК приймають рішення про досягнення зразком граничного стану (або можливе досягнення його за час до наступного огляду), то проведення середнього ремонту зразка може дозволити продовжити його ресурс (термін служби). Це стосується не всіх зразків, оскільки для деяких з них проведення середнього ремонту є недоцільним.

Оскільки базові конструкції АЗК (стояки, монтажні пристрої, контейнери, корпуси пристроїв тощо) зношуються і старіють не

дуже швидко, то доцільно середній ремонт АЗК виконувати шляхом демонтажу і заміни складових частин (СЧ-блоків, субблоків, касет, комплектуючих виробів).

Послідовність проведення середнього ремонту така.

Після прийняття рішення про припинення експлуатації зразка АЗК ремонтне підприємство в експлуатуючу організацію направляють виїзну бригаду спеціалістів для виконання середнього ремонту зразка АЗК шляхом заміни складових частин. Необхідні для заміни складові частини надходять в експлуатуючу організацію з обмінного фонду ремонтного підприємства (їх також може привезти виїзна бригада). Ремонтне підприємство ремонтує також складові частини, які необхідно замінити.

В деяких випадках (наприклад, якщо потрібно замінити велику кількість складових частин) зразок АЗК надсилають на ремонтне підприємство, де проводять його перевірку і дефектацію; на підставі висновків про стан зразка, отриманих з центру прогнозування за результатами діагностування, визначають складові частини, стан яких може призвести до граничного стану зразка (дефектні складові частини), і замінюють їх. Якщо кількість дефектних складових частин значна і (або) є значні пошкодження базових конструкцій, то приймають рішення про списання зразка. Складові частини списаного зразка, стан яких є задовільним, надходять до обмінного фонду ремонтного підприємства для використання їх під час середнього ремонту інших зразків.

Після заміни дефектних складових частин проводять технічний огляд і перевірку зразка, після чого його надсилають на місце експлуатації (якщо його ремонтували на ремонтному підприємстві).

Дефектні складові частини, демонтовані зі зразка, який ремонтували, надходять на дільницю середнього ремонту складових частин ремонтного підприємства. Тут проводять оцінювання технічного стану складових частин, здійснюють пошук несправностей з використанням спеціального діагностичного обладнання і приймають рішення про доцільність середнього ремонту складової частини. Якщо складова частина підлягає середньому ремонту, то проводять ремонт за технологією, наведеною в ремонтній документації, з використанням елементів і деталей зі складу ремонтного ЗІП. Відремонтована складова частина надходить до обмінного фонду ремонтного підприємства для

використання під час середнього ремонту зразків апаратури контролю.

Схема функціонування системи експлуатації й середнього ремонту АЗК в період після закінчення терміну служби (ресурсу) наведена на рис. 3.1, де застосовано такі позначення:

ЕО – експлуатуюча організація;

РП – ремонтне підприємство;

ЦП – центр прогнозування;

ДРАЗК – дільниця середнього ремонту АЗК;

ДРСЧ – дільниця середнього ремонту складових частин;

ОФСЧ – обмінний фонд складових частин;

ЗІП-Р – комплект ремонтного ЗІП;

СЧ – складова частина;

1 – надходження даних про результати технічного огляду;

2 – надходження результатів прогнозування;

3 – надходження зразка на РП;

4 – надходження зразка в ЕО;

5 – надходження справних СЧ;

6 – надходження дефектних СЧ;

7 – списання зразків;

8 – надходження відремонтованих СЧ;

9 – утилізація СЧ;

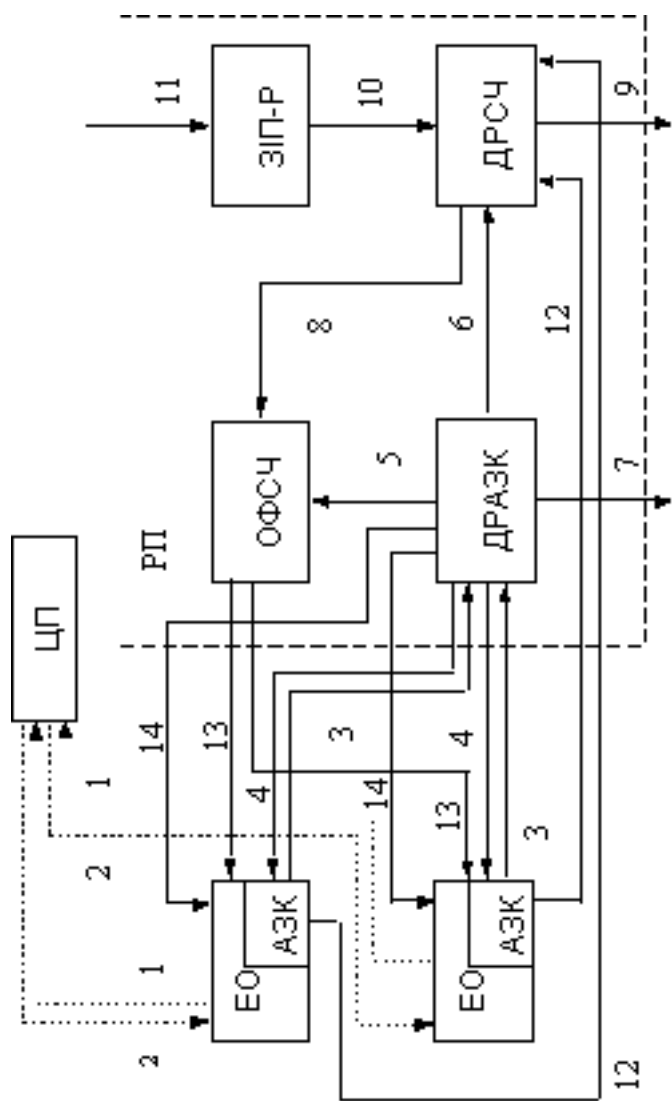
10 – надходження запасних елементів;

11 – поповнення ЗІП-Р;

12 – надходження СЧ з ЕО для середнього ремонту;

13 – надходження СЧ в ЕО для заміни;

14 – відрядження бригади спеціалістів в ЕО для виконання ремонту.





## Методичні вказівки

Забезпечення довговічності АЗК закладається вже на ранніх етапах проектування. Звичайно довговічність АЗК значною мірою залежить від довговічності комплектуючих ЕРЕ. Тому важливим в системі заходів забезпечення довговічності АЗК є вибір елементної бази, застосування елементів з відповідними показниками довговічності, комплектування запасними елементами, обґрунтування термінів, послідовності та технологій заміни елементів, обсягів і періодичності перевірок АЗК в процесі експлуатації.

Грамотна організація експлуатації АЗК має суттєве значення для забезпечення їх безвідмовності та довговічності. Важливо знати зміст конкретних заходів, які спрямовані на забезпечення високого рівня довговічності об'єктів АЗК. Ці заходи забезпечуються точним і неухильним виконанням вимог експлуатаційної документації, проведенням призначених нею робіт у повному обсязі, якісно і з дотриманням зазначених термінів.

На практиці можуть виникнути ситуації, коли необхідно буде зменшувати періодичність технічного обслуговування автоматичних засобів контролю або проводити організаційну роботу з продовження їх ресурсу (терміну служби). У зв'язку з цим слід детально ознайомитися з методом самоконтролю АЗК, його організацією, з критеріями оцінювання, а також з правилами прийняття рішення щодо продовження ресурсу і терміну служби.

## Запитання для самоперевірки

1. Назвіть методи забезпечення довговічності АЗК на етапі їх розробки.
2. Яким правилом користуються при виборі елементної бази АЗК?
3. Розкажіть про призначення ЗІП і сформулюйте принцип визначення номенклатури та кількості запасних елементів до ЗІП.
4. Коли і в якій послідовності здійснюється примусова заміна елементної бази АЗК?
5. В чому полягає періодична перевірка й регулювання визначальних параметрів АЗК в процесі експлуатації?

6. Назвіть методи забезпечення й підвищення довговічності АЗК на етапі експлуатації.

7. Коли, з якою метою і яким чином здійснюється зменшення періодичності технічного обслуговування АЗК?

8. Які заходи застосовують під час організації робіт для продовження ресурсу (терміну служби) АЗК?

9. Ким і яким чином приймається рішення про продовження терміну служби АЗК?

10. Яку роль у комплексі заходів для продовження терміну служби АЗК відіграє середній ремонт?

## ГЛАВА 4. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АЗК

### 4.1. Вибір математичної моделі прогнозування

Прогнозування якості технічних об'єктів є однією з конкретних форм прогнозування матеріальних явищ натурального світу. Всі існуючі методи прогнозування базуються на постулаті Шеннона: “Загалом фізичне уявлення залежить від припущення, що закономірності, які спостерігались у минулому, збережуться в майбутньому. Це припущення не може бути доведено індуктивно, тобто лише математичною аргументацією, тому, що можна легко уявити математичний світ, у якому це припущення є неправильним. Також це не може бути встановлено дедуктивно, тобто узагальненням з експерименту, тому, що таке узагальнення базуватиметься на припущеннях, які ми намагаємось встановити. Це припущення можна розглядати як один з центральних постулатів фізики”.

З усіх розроблених на цей час методів прогнозування технічного стану об'єкта можна виділити наступні.

1. *Метод канонічного розкладення випадкового процесу* [9]. Цей метод, який використовує апарат канонічних уявлень, дає можливість отримати лінійну аналітичну модель апостеріорного випадкового процесу, яка дозволяє оптимальним чином вирішувати задачу екстраполяції (прогнозування) реалізації випадкового процесу, оцінювати похибку екстраполяції і відтворювати методом моделювання апостеріорний випадковий процес в цілому.

Перевагою методу канонічного розкладення випадкового процесу є його універсальність. До недоліків слід віднести труднощі, пов'язані з застосуванням статистичного моделювання, і необхідність в наявності вичерпної інформації про характеристики випадкового процесу у певні моменти часу. Зокрема, для АЗК це означає, що потрібно мати інформацію про параметри самоконтролю достатньої сукупності зразків АЗК одного типу, “одного віку” і в одні й ті самі моменти часу, що практично здійснити надзвичайно складно.

2. *Індуктивний метод самоорганізації* [7]. Метод базується на переборі різних варіантів математичних моделей зміни з часом параметрів об'єкта прогнозування при поступовому зростанні складності моделей. Такий підхід впливає з принципу самоорганізації, який полягає в тому, що при поступовому зростанні склад-

ності моделі зовнішній критерій спочатку зменшується, а далі проходить через мінімум і починає зростати. Мінімум критерію визначає єдину модель оптимальної складності. Звичайно як критерій приймають мінімум середньоквадратичної похибки, а пошук моделей проводять серед сім'ї, яка описується степеневим поліномом. Розглянемо сутність методу. Всю вибірку експериментальних даних поділяють на дві або більше частин (в залежності від специфіки задачі). На першій вибірці, яка називається навчальною, оцінюють коефіцієнти моделі (коефіцієнти полінома), а на другій вибірці, яка називається перевіркою, оцінюють якість отриманих моделей за спеціальними критеріями (критерій регулярності, критерій зміщення тощо).

У більшості випадків якість моделей зі зростанням складності покращується і при певній моделі, яка називається оптимальною, досягає максимуму.

Перевагою індуктивного методу самоорганізації є майже стовідсоткова гарантія успіху за умови, що серед багатьох конкуруючих моделей міститься істинна модель. Недоліками індуктивного методу можна вважати, в першу чергу, необхідність у значному обсязі вибірки (наприклад, якщо складність моделі обмежити поліномом другого степеня, то кількість членів вибірки повинна бути не меншою шести), а також потреба у більшому часі обчислень і обсязі пам'яті ЕОМ.

3. *Метод оптимальної фільтрації* [14]. В основу цього методу покладено принцип адекватності між задачею прогнозування технічного стану і задачею попередження в теорії оптимальної фільтрації. Критерієм оптимальності, як і в попередньому випадку, вибирають мінімум середнього квадрата похибки. Як модель сигналу параметра, який спостерігають, приймають степеневий поліном з випадковими коефіцієнтами (відомо, що для радіоелектронної апаратури степінь полінома не перевищує другого), на який накладається стаціонарний випадковий процес, обумовлений "шумом" і похибкою спостереження. Цей сигнал є вхідним для оптимального прогнозуючого фільтра, а на виході відповідає значенню параметра у прогнозований момент часу. Перевагою даного методу є те, що він не вимагає інформації про характеристики випадкового процесу, який описує параметр, але водночас виникає необхідність у ймовірнісних характеристиках випадкових коефіцієнтів полінома.

Розроблено алгоритм отримання такої інформації за відповідними характеристиками електрорадіоелементів апаратури і коефіцієнтами їхнього впливу на параметр, який спостерігають, але практично реалізувати його надзвичайно складно [14].

На підставі аналізу існуючих методів прогнозування [8-15] і, враховуючи, що кількість моментів спостереження за параметрами самоконтролю АЗК обмежена (від 3 до 5), а інформація про характеристики випадкового процесу зміни параметрів самоконтролю відсутня, для прогнозування значень параметрів самоконтролю АЗК вибрано *метод найменших квадратів*. Як математична модель взята детермінована функція часу у вигляді полінома другого степеня зі сталими коефіцієнтами.

#### 4.2. Методика прогнозування технічного стану АЗК

Припустимо, що істинна зміна у часі параметра описується невідомою функцією  $\xi(t)$ . Задача полягає в тому, щоб, по-перше, знайти або задати апроксимуючу функцію  $\hat{\xi}(a_0, \dots, a_n, t)$  – підібрати адекватну модель, тобто модель, яка найбільше відповідає істинній моделі, так, щоб з достатньою точністю  $\xi(t) \approx \hat{\xi}(a_0, \dots, a_n, t)$ , а також знайти значення параметрів  $a_0, \dots, a_n$ , оптимальних за критерієм мінімуму середнього квадрата похибки, тобто:

$$\min_{a_0, \dots, a_n} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{\xi}(a_0, \dots, a_n, t_i)]^2, \quad (4.1)$$

де  $y_i$  – результат середнього квадрата параметра АЗК в момент часу  $t_i$ .

Як апроксимуючу модель зміни параметра у часі вибираємо функцію

$$\hat{\xi}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (4.2)$$

припускаючи, що її коефіцієнти не є випадковими величинами. Підставою для такого вибору є дані, наведені в [14], а також статистичний аналіз результатів самоконтролю, який свідчить, що для більшості параметрів самоконтролю характерним є повільна зміна значень у часі.

Підставивши 4.2 в 4.1, отримавши частинні похідні по  $a_0, a_1$ ,

$a_2$  і порівнявши їх до нуля, отримуємо систему рівнянь для визначення оптимальних значень коефіцієнтів:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n t_i + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n \acute{o}_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n t_i + a_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^3 = \sum_{i=1}^n \acute{o}_i t_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n t_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n t_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n \acute{o}_i t_i^2. \end{cases} \quad (4.3)$$

Введемо такі позначення:

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad C_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2; \quad C_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^3; \quad C_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^4.$$

Знайдемо з першого рівняння оптимальне значення  $a_{0on}$ :

$$a_{0on} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - a_1 C_1 - a_2 C_2 \quad (4.4)$$

і підставимо його у друге і третє рівняння. Розв'язавши їх, отримаємо вирази для оптимальних значень  $a_1$  і  $a_2$  у такому вигляді:

$$a_{1on} = \sum_{i=1}^n B_i \acute{o}_i; \quad (4.5)$$

$$a_{2on} = \sum_{i=1}^n A_i y_i, \quad (4.6)$$

де

$$B_i = \frac{(t_i^2 - C_2)C_7 - (t_i - C_1)C_6}{n(C_5 C_6 - C_7^2)};$$

$$A_i = \frac{(t_i - C_1)C_7 - (t_i^2 - C_2)C_5}{n(C_5 C_6 - C_7^2)};$$

$$C_5 = C_1^2 - C_2; \quad C_6 = C_2^2 - C_4; \quad C_7 = C_1 C_2 - C_3.$$

Підставивши 4.5 і 4.6 в 4.4, отримаємо

$$a_{0on} = \sum_{i=1}^n D_i y_i, \quad (4.7)$$

де  $D_i = \frac{1}{n} - C_1 B_i - C_2 A_i$ .

Таким чином, прогнозоване значення параметра самоконтролю (СК) через інтервал часу  $h$  після останнього вимірювання в момент часу  $h_n$  визначиться за такою формулою:

$$\xi_{n+1} \approx \hat{\xi}(\bar{a}_{on}; t_n + h) = \sum_{i=1}^n y_i H_i(\bar{a}_{on}; t_n + h), \quad (4.8)$$

де  $H_i(\bar{a}_{on}; t_n + h) = D_i + C_1 B_i(t_n + h) + C_2 A_i(t_n + h)^2$ ;

$$\bar{a}_{on} = \{a_{0on}, a_{1on}, a_{2on}\}.$$

Результати самоконтролю параметра  $y_1, \dots, y_n$  є випадковими величинами тому, що їх отримання пов'язане з випадковою похибкою самоконтролю  $\delta$ , яка має дві складові:

$\delta_1$  – похибка вимірювання параметра самоконтролю (визначення характеристики точності каналу самоконтролю);

$\delta_2$  – похибка дискретизації, яка обумовлена тим, що результат вимірювання параметра подається у вигляді градації поля допуску.

Обидві складові похибки самоконтролю незалежні. Математичне сподівання  $\delta_1$  АЗК можна вважати таким, що дорівнює нулю; математичне сподівання  $\delta_2$  також дорівнює нулю, оскільки за значення  $y_i$  прийнято середину градації.

Тоді, враховуючи, що похибка  $\delta_2$  має рівномірну щільність розподілу ймовірностей, середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{\delta_2}$ , виражене у градаціях, знаходять за формулою

$$\sigma_{\delta_2} = \frac{1}{2\sqrt{3}}.$$

Таким чином,

$$m_{\delta} = 0; \quad \sigma_{\delta} = \sqrt{\frac{1}{12} + \sigma_{\delta_1}^2}. \quad (4.9)$$

Застосувавши методи обчислення математичного сподівання і дисперсії до обох частин рівняння 4.8, отримаємо вирази для математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення прогнозованого значення параметра самоконтролю:

$$m_{\xi_{n+1}} = \xi_{n+1}; \quad \sigma_{\xi_{n+1}} = \sigma_{\delta} \sqrt{\sum_{i=1}^n H_i^2 (\bar{a}_{on}; t_n + h)}. \quad (4.10)$$

Нарешті, припустивши, що щільність розподілу ймовірностей величини  $\xi_{n+1}$  є близькою до нормальної, можна з надійною ймовірністю, яка дорівнює 0,95, стверджувати, що в момент часу  $t_n + h$  значення параметра самоконтролю не вийде за межі допуску, якщо виконується умова:

$$\left( |\xi_{n+1}| + 2\sigma_{\xi_{n+1}} \right) \leq \frac{N}{2}, \quad (4.11)$$

де  $N$  – кількість градацій, на яку поділено допуск параметра самоконтролю (звичайно  $N=16$ ).

Таким чином, послідовність прогнозування технічного стану АЗК така.

1. У базі даних накопичуються результати самоконтролю АЗК за попередні  $n$  циклів технічного обслуговування.

2. За формулами 4.8 і 4.10 визначають:

– прогнозовані значення параметрів самоконтролю на момент наступного технічного обслуговування  $\xi(t_n + h)$ ;

– середньоквадратичне відхилення прогнозування  $\sigma_{\xi_{n+1}}$ .

3. Визначають результат прогнозування:

– “придатний”, якщо нерівність 4.11 виконується;

– “непридатний”, якщо нерівність 4.11 не виконується.

Розглянемо приклад. Зразок 0000001 апаратури АЗК-Х експлуатується протягом десяти років. Починаючи з “віку” 6 років, щорічно проводиться спеціальний технічний огляд АЗК, до якого входить триразовий самоконтроль параметрів. За значення параметра, який спостерігають, взято математичне сподівання

$$y_i = \sum_{j=1}^3 X_{ij},$$

де  $X_{ij}$  – результат  $j$ -го самоконтролю в момент часу  $t_i$ .

В табл. 4.1 наведені вихідні дані, необхідні для прогнозування технічного стану АЗК:

– значення параметрів самоконтролю  $y_i$ ;

– похибка вимірювання параметрів самоконтролю.



Таблиця 4.1

Час, рік	6	7	8	9	10	СКВ похибки вимірювання, град
Номер параметра самоконтролю	Значення математичного сподівання в часових перерізах					
1 – 1	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	0,1
1 – 2	-1,5	2,0	3,5	4,5	6,5	0,1
1 – 3	-1,5	-2,5	-4,5	-4,5	-5,5	0,1
1 – 4	-1,5	-2,5	-0,5	0,5	-0,5	0,1
1 – 5	-1,5	-0,5	-4,5	-3,5	-6,5	0,1
1 – 6	-1,5	-1,5	-3,5	-3,5	-4,5	0,1
1 – 7	-1,5	-0,5	-4,5	-3,5	-6,5	0,1

В табл. 4.2 наведені результати прогнозу на 1 рік, тобто, коли “вік” АСК-Х досягне одинадцяти років.

З аналізу результатів прогнозу випливає, що значення параметрів 1-1, 1-3, 1-4 та 1-6 залишаться в межах допуску, а параметри 1-2, 1-5 та 1-7 вийдуть за межі цього допуску. Градації +8 і –8 знаходяться за межами допуску тому, що градації, які межують з серединою допуску, звичайно вважають такими, що дорівнюють +0 і –0. Крім того, в таблиці наведені значення СКВ прогнозованого значення  $\sigma_{\xi_{n+1i}}$ , а також середньоквадратичного відхилення апроксимації  $\sigma_{ai}$ .

Таблиця 4.2

Номер параметра СКВ	Час прогнозу, рік	Прогнозоване значення, град.	СКВ прогнозованого значення, град.	Результат прогнозування	СКВ апроксимації, град.
1-1	1	-1	0,655	Придатний	0,0
1-2	1	+8	0,655	Непридатний	0,338
1-3	1	-5	0,655	Придатний	0,717
1-4	1	+0	0,655	Придатний	1,621
1-5	1	-8	0,655	Непридатний	2,293
1-6	1	-5	0,655	Придатний	0,894
1-7	1	-8	0,655	Непридатний	2,293

### **4.3. Визначення основних частин АЗК, які підлягають заміні за результатами прогнозування\***

#### ***4.3.1. Аналіз методів локалізації дефектних складових частин апаратури***

Загальна постановка задачі локалізації дефектних складових частин апаратури така. Припустимо, що виріб складається з  $N$  елементів, які довільним чином з'єднані один з одним і для яких відомі апріорні ймовірності відмов. Відомий також кінцевий простір перевірок виробу, кожна з яких має свою вартість, охоплює деяку підмножину елементів і може мати два визначених результати: позитивний (“придатний”) або негативний (“непридатний”). Зробимо такі припущення:

- несправним може бути тільки один елемент виробу;
- несправність будь-якого елемента викликає несправність всього виробу;
- кількість перевірок є достатньою для відшукування будь-якого несправного елемента за скінчену кількість кроків.

Необхідно визначити стратегію (алгоритм) пошуку, за допомогою якої можна було б за скінчену кількість кроків (перевірок) знаходити елемент, який відмовив, і яка була б оптимальною за одним з вибраних критеріїв (показників): вартістю, надійністю, часом тощо.

Умовно всі алгоритми пошуку несправності можна поділити на такі групи.

#### *1. Алгоритми, що використовують параметри надійності*

1.1. Алгоритм, мінімізуючий відношення ймовірності відмови елемента до часу, необхідного для його перевірки [13]. Реалізація цього алгоритму передбачає послідовність перевірок, яка відповідає зростанню вибраного параметра.

1.2. Алгоритм, який розглядає пошук несправностей як поглинаючий марковський ланцюг [4]. Вихідні дані, необхідні для його реалізації: апріорні ймовірності відмов елементів, скінчений простір перевірок, результати перевірок та вартість кожної пере-

---

\* Зміст розділу базується на ідеях В.Г. Кенделя

вірки. Задаючись стратегією пошуку і застосувавши рекурентне рівняння для очікуваних втрат методом послідовних наближень, знаходять оптимальну стратегію, яка мінімізує середні втрати.

## *2. Інформаційний алгоритм [14]*

Інформаційні алгоритми пошуку несправностей базуються на інформаційному оцінюванні процесу діагностування. Задача полягає у виборі мінімальної кількості діагностичних параметрів і визначенні послідовності перевірок. Вихідними даними є таблиця станів, у якій стовпці відповідають всім можливим станам, а рядки – всім можливим перевіркам. Пошук починається з перевірки, якій відповідає найбільше значення інформації. Далі на кожному кроці здійснюються перевірки, яким відповідає найбільше значення умовної інформації відносно стану, який визначається ентропією кожної перевірки. Пошук закінчується тоді, коли значення умовної ентропії буде дорівнювати нулю.

У випадку, коли виріб складається з елементів, які з'єднані послідовно і мають однакові значення ймовірностей відмов, інформаційний алгоритм являє собою метод половинного поділу, згідно з яким виріб першою перевіркою поділяється навпіл, а далі, в залежності від отриманого результату, виконується перевірка, яка поділяє одну з половин ланцюга навпіл і т.д.

## *3. Метод гілок і меж [12]*

Цей метод може бути застосований для пошуку несправностей у складному технічному об'єкті, коли необхідно виконати оптимальну послідовність за критерієм мінімуму вартості реалізації алгоритму пошуку.

Аналізуючи викладені вище існуючі методи пошуку несправностей з точки зору можливості їх застосування для вирішення задачі визначення складових частин АЗК, які підлягають заміні у прогнозований момент часу, можна зробити однозначний висновок про неприйнятність їх використання з таких міркувань.

1. У прогнозований момент часу можуть відмовити декілька складових частин АЗК, а розроблені алгоритми базуються на припущенні, що в момент перевірки несправним є лише один елемент.

2. Припущення про достатність простору перевірок не завжди відповідає реальним умовам в реальних каналах перевірки АЗК.

Це викликає необхідність розробки оригінальної методики визначення складових частин АЗК, які підлягають заміні у прогнозованій момент часу. Така методика повинна враховувати особливості визначення і прогнозування технічного стану автоматичних засобів контролю.

#### **4.3.2. Особливості АЗК як об'єкта діагностування**

Технічний стан АЗК в режимі самоконтролю визначається шляхом послідовної перевірки параметрів самоконтролю. Крім того, окремо перевіряють спеціалізовану цифрову обчислювальну машину (СЦОМ), основна задача якої – керування процесом контролю і обробки інформації, яка надходить від об'єкта контролю. Діагностування СЦОМ здійснюється за допомогою спеціальних тестів і в цьому навчальному посібнику не розглядається.

Кожний параметр самоконтролю перевіряє деяку сукупність пристроїв АЗК (функціональних модулів – ФМ), які розташовані, як правило, послідовно і утворюють канал (тракт) самоконтролю. ФМ1 – це джерело сигналу (генератор стимулюючого сигналу, джерело контрольного сигналу, вторинне джерело живлення, цифро-аналоговий перетворювач тощо), рештою ФМ можуть бути комутатори, первинні перетворювачі, перетворювачі аналог-код тощо. Номінальним значенням параметра самоконтролю є номінальне значення сигналу ФМ1, а допуском параметра самоконтролю – межа допустимої похибки каналу, яка є сумою (композицією) меж допустимих похибок ФМ, які входять до цього каналу. Той самий ФМ може входити до декількох каналів самоконтролю. Інформація в каналах самоконтролю оформляється у вигляді трактових схем самоконтролю. Приклад трактової схеми наведено на рис 4.1.



Рис. 4.1. Тракт самоконтролю

Потрібно вирішити таку задачу: використовуючи трактові схеми самоконтролю, характеристики точності і надійності ФМ, а також результати прогнозування і перевірки параметрів СК, визначити перелік ФМ, які підлягають заміні або відновленню.

### Вихідні дані

Вихідні дані для розв'язування поставленої задачі:

- трактові схеми самоконтролю;
- апіорна ймовірність того, що у прогнозований момент часу  $t_n$   $j$ -й ФМ опиниться в непрацездатному стані ( $q_{1,j} = \overline{1, N}$ , де  $N$  – кількість ФМ, які перевіряють);
- результати самоконтролю (“придатний” чи “непридатний” по кожному параметру самоконтролю) в моменти часу, які передують  $t_n$ ;
- ймовірності похибок прогнозування по кожному параметру самоконтролю:

1) ризик виробника  $\beta$  – ймовірність того, що значення параметра, результат прогнозування за яким “придатний”, в дійсності в момент часу  $t_n$  вийде за межі допуску;

2) ризик замовника  $\alpha$  – ймовірність того, що значення параметра, результат прогнозування за яким “непридатний”, в дійсності в момент  $t_n$  перебуватиме в межах допуску.

Ці вихідні дані зручно оформити у вигляді таблиці. Основна частина таблиці являє собою матрицю, рядки якої відповідають параметрам самоконтролю, а стовпці – ФМ, які перевіряють. Якщо  $i$ -й параметр перевіряє  $j$ -й ФМ, то на перетині  $i$ -го рядку і  $j$ -го стовпця записують значення  $q_j$ , в супротивному випадку – 0. Крім того, таблиця має стовпець, в кожен рядок якого записують результат прогнозування (“п”, якщо результат “придатний”, і “н”, якщо результат “непридатний”), і два стовпці, в які записують ризик виробника і ризик замовника по кожному параметру самоконтролю. В табл. 4.3 наведені вихідні дані для апаратури АЗК-Х, розглянутої у параграфі 4.3.

Таблиця 4.3

Параметри самоконтролю – функціональні модулі	ФМ 1	ФМ 2	ФМ 3	ФМ 4	ФМ 5	ФМ 6	ФМ 7	Результат прогнозування	Ризик виробника	Ризик замовника
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1-1	$q_1$	$q_2$	0	0	0	0	0	п	$\alpha_1$	$\beta_1$

Закінчення таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1-2	0	$q_2$	0	$q_4$	0	$q_6$	0	н	$\alpha_2$	$\beta_2$
1-3	$q_1$	0	$q_3$	0	$q_5$	0	0	п	$\alpha_3$	$\beta_3$
1-4	0	$q_2$	0	0	0	0	$q_7$	п	$\alpha_4$	$\beta_4$
1-5	$q_1$	0	0	0	$q_5$	$q_6$	0	н	$\alpha_5$	$\beta_5$
1-6	$q_1$	$q_2$	0	0	$q_5$	0	$q_7$	п	$\alpha_6$	$\beta_6$
1-7	$q_1$	0	$q_3$	$q_4$	0	0	0	н	$\alpha_7$	$\beta_7$

Методика визначення  $q_j$  полягає в наступному.

1. За методикою, запропонованою в [6], визначають відхилення параметра ФМ від номінального значення з урахуванням зношення і старіння.

2. Закон розподілу цих відхилень вважають нормальним, а граничне значення таким, що дорівнює трьом середньоквадратичним відхиленням ( $3\sigma$ );

3. За відомим значенням  $\sigma$  визначають ймовірність  $q_j$  за формулою

$$q_j = 1 - 2\Phi_0(x),$$

де  $\Phi_0(x)$  – нормована функція Лапласа при  $\left(x = \frac{\Delta_{\text{зм}}}{2\sigma}\right)$ , якщо  $\Delta_{\text{зм}}$  –

межа допустимої похибки ФМ.

Перш, ніж почати розв'язувати задачу визначення переліку ФМ, які підлягають заміні або відновленню, потрібно вибрати показник, за яким можна було б оцінювати технічний стан ФМ у прогнозований момент часу, а також вирішальне правило, за яким ФМ слід замінити (відновити). Аналіз наявних вихідних даних показав, що найбільш прийнятною оцінкою технічного стану ФМ є апостеріорна ймовірність відмов ФМ  $q^a$ , тобто ймовірність того, що ФМ відмовить на момент  $t_n$  за умови, що в попередні моменти часу був проведений самоконтроль, за результатами якого здійснювалось

прогнозування параметрів самоконтролю і визначався ризик виробника і ризик замовника. Тоді як вирішальне правило доцільно прийняти нижню межу допустимого значення апостеріорної ймовірності  $q_m^a$ , тобто, якщо  $q^a \geq q_m^a$ , то приймають рішення про необхідність заміни або ремонту ФМ. Значення  $q_m^a$  може бути визначене методом експертних оцінювань і повинно уточнюватись на підставі статистичного аналізу даних, накопичених в процесі експлуатації зразків АЗК.

При розв'язанні цієї задачі слід обов'язково враховувати взяте припущення, яке полягає в тому, що за умови відсутності похибок прогнозування результат “придатний” означає, що всі ФМ, які входять в канал самоконтролю, який перевіряється, в момент часу  $t_n$  будуть працездатними, а результат “непридатний”, – що хоча б один з ФМ, які входять до каналу самоконтролю, в момент часу  $t_n$  відмовить.

#### *Розв'язок задачі*

Задачу визначення апостеріорних ймовірностей відмов ФМ розв'язують у два етапи.

*Етап 1.* Розглядають ФМ, які входять до тих каналів самоконтролю, результат прогнозування параметрів яких “придатний” (для даних табл. 4.3). Такими параметрами є: 1-1, 1-3, 1-4, 1-6, а до відповідних каналів самоконтролю входять модулі ФМ1, ФМ2, ФМ3, ФМ5 та ФМ7.

Припустимо, що  $j$ -й ФМ входить до  $m_n$  каналів СК, для яких отримано результат прогнозування “придатний”. Всього в цих каналах самоконтролю перевіряють  $k_n$  ФМ. Позначимо подію, яка означає відмову  $j$ -го ФМ на момент часу  $t_n$  з урахуванням зазначених умов, через  $A$ . Ця подія відбудеться за умови одночасного настання двох подій –  $B$  і  $C$ , де подія  $B$  означає, що всі  $m_n$  каналів самоконтролю дійсно будуть непрацездатними в момент часу  $t_n$ , а подія  $C$ , – що серед  $m_n$  відмовить саме  $j$ -й ФМ.

Оскільки події  $B$  і  $C$  взаємозалежні, то

$$q_j^{a,n} = P(A) = P(B) \cdot P(C/B).$$

Ймовірність події  $B$  визначається за формулою

$$P(B) = \frac{\beta(m_n)}{1 - Q(m_n) - \alpha(m_n) + \beta(m_n)},$$

де  $Q(m_n)$  – апіорна ймовірність того, що всі  $m_n$  каналів СК дійсно будуть непрацездатними в момент часу  $t_n$ ;

$\alpha(m_n)$ ,  $\beta(m_n)$  – відповідно ризик виробника і ризик замовника за сукупністю  $m_n$  параметрів самоконтролю.

Умовна ймовірність події  $C$  визначається за формулою

$$P(C / B) = \frac{q_j}{Q(m_n)}.$$

Таким чином,

$$q_j^{a.n} = \frac{\beta(m_n)q_j}{[1 - Q(m_n) - \alpha(m_n) + \beta(m_n)] \cdot Q(m_n)}. \quad (4.12)$$

У загальному випадку ймовірність  $Q(m_n)$  обчислюють за формулою

$$Q(m_n) = \sum_{i=1}^L Q_i,$$

де  $Q_i$  – ймовірність  $i$ -ої комбінації станів ФМ, за умови якої всі  $m_n$  каналів самоконтролю будуть непрацездатними в момент часу  $t_n$ ;

$L$  – кількість таких комбінацій.

Наприклад, якщо  $r$ -та комбінація відповідає стану відмов всіх

$$k_n \text{ ФМ, то } Q_r = \prod_{i=1}^{k_n} Q_i.$$

У загальному випадку

$$Q_i = \prod_{j=1}^{k_n} (Iq_j + (1 - I)(1 - q_j)),$$

де  $I$  – функція, яка набуває значення 1, якщо  $j$ -ий ФМ відмовив, або 0, якщо  $j$ -ий ФМ працездатний.

Як приклад визначимо величину  $Q(m_n)$  для модулів ФМ1, ФМ2, ФМ3, ФМ5 та ФМ7 (див. табл. 4.3). Комбінація станів модулів і відповідні ймовірності наведені в табл. 4.4-4.7, в яких символ “п” означає, що для ФМ взято стан працездатності, “н” – стан від-



мови, а “-” – ФМ може перебувати у будь-якому стані. Знак мінус перед ймовірністю означає, що така комбінація станів ФМ врахована двічі і тому при обчисленні  $Q(m_n)$  її потрібно відняти.

Таблиця 4.4

ФМ1					$Q_i$
ФМ1	ФМ2	ФМ3	ФМ5	ФМ7	
н	-	-	-	-	$q_1$
п	н	н	-	-	$(1 - q_1)q_2q_3$
п	н	п	н	-	$(1 - q_1)q_2(1 - q_3)q_5$

Таблиця 4.5

ФМ2				$Q_i$
ФМ1	ФМ2	ФМ5	ФМ7	
-	н	-	-	$q_2$
н	п	-	н	$q_1(1 - q_2)q_7$

Таблиця 4.6

ФМ5					$Q_i$
ФМ1	ФМ2	ФМ3	ФМ5	ФМ7	
н	-	-	-	-	$q_1$
-	-	-	н	-	$q_5$
п	-	н	п	н	$(1 - q_1)q_3(1 - q_5)q_7$
п	н	н	п	-	$(1 - q_1)q_2q_3(1 - q_5)$
н	-	-	н	-	$-q_1q_5$

Таблиця 4.7

ФМ7				$Q_i$
ФМ1	ФМ2	ФМ5	ФМ7	
-	н	-	-	$q_2$
-	-	-	н	$q_7$
-	н	-	н	$-q_2q_7$

Для ФМ3  $Q(m_n) = Q(1) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_3)(1 - q_5)$ , оскільки він перевіряється тільки за допомогою параметра 1-3.

Визначення ризику виробника  $\alpha(m_n)$  і ризику замовника  $\beta(m_n)$  є складною задачею, оскільки параметри самоконтролю, в загальному випадку, є взаємозалежними внаслідок того, що до різних каналів самоконтролю входять ті ж самі ФМ. Тому доцільно обчислити верхні і нижні оцінки цих величин:

$$\max_{i \in \overline{1, m_n}} \alpha_i < \alpha(m_n) < \sum_{i=1}^{m_n} \alpha_i ; \quad (4.13)$$

$$\max_{i \in \overline{1, m_n}} \beta_i < \beta(m_n) < \sum_{i=1}^{m_n} \beta_i . \quad (4.14)$$

За умови великих значень  $m_n$  і великої кількості ФМ обчислення ймовірностей  $q_j^{a,n}$  за формулою 4.12 стає трудомісткою задачею навіть з застосуванням ЕОМ. У цьому випадку доцільно обчислювати верхню оцінку за формулою

$$\widehat{q}_j^{a,n} = q_j \prod_{i=1}^{m_n} \frac{\beta_i}{(1 - Q_i - \alpha_i + \beta_i) Q_i} , \quad (4.15)$$

де  $Q_i = 1 - \sum_{j=1}^{k_i} (1 - q_j)$  – апіорна ймовірність того, що  $i$ -ий канал самоконтролю буде непрацездатним в момент часу  $t_n$ ;

$k_i$  – кількість ФМ, які входять до  $i$ -го каналу самоконтролю.

Формула 4.15 дає потрібну точність при  $m_n = 1$ , а також у випадку, якщо параметри самоконтролю взаємозалежні.

*Етап 2.* Розглядають канали самоконтролю, які визначаються параметрами, за якими отримано результат “непридатний” (для вхідних даних табл. 4.3 це параметри: 1-2, 1-5, 1-7). Якщо до цих каналів входять ФМ, що приймали участь також і в каналах самоконтролю, визнаних придатними, то для них як вихідну ймовірність відмови приймають апостеріорну ймовірність  $q_j^{a,n} (j = \overline{1, k_n})$ , обчислену за формулами 4.12 або 4.15. Для зручності подальших обчислень складаємо табл. 4.8.

Обчислюють апостеріорні ймовірності відмови ФМ, які входять до каналів самоконтролю, визначених непрацездатними в момент часу  $t_n$  (в нашому прикладі – це модулі ФМ 4 і ФМ 6). Припус-

тимо, що  $j$ -ий ФМ входить до  $m_n$  каналів самоконтролю, для яких отримано результат прогнозування “непридатний”. Всього в цих каналах перевіряються  $k_n$  ФМ. Виходячи з тих самих міркувань, які були використані для виведення формули 4.12, отримуємо таку формулу:

$$q_j^{a,n} = \frac{[Q(m_n) - \beta(m_n)]q_j}{[Q(m_n) + \alpha(m_n) - \beta(m_n)]Q(m_n)}, \quad (4.16)$$

де  $Q(m_n)$  – апіорна (але з урахуванням отриманих для частини ФМ ймовірностей  $q_j^{a,n}$ ) ймовірність того, що всі канали самоконтролю дійсно будуть неприцездатними в момент часу  $t_n$ ;

$\alpha(m_n)$  – ризик виробника за сукупністю  $m_n$  параметрів самоконтролю;

$\beta(m_n)$  – ризик замовника за сукупністю  $m_n$  параметрів самоконтролю.

Таблиця 4.8

Параметри са-моконтролю	Функціональні модулі							Результат прогнозування	Ризик виробника	Ризик замовника
	ФМ1	ФМ2	ФМ3	ФМ4	ФМ5	ФМ6	ФМ7			
1 – 2	0	$q_2^{a,n}$	0	$q_4$	0	$q_6$	0	н	$\alpha_2$	$\beta_2$
1 – 5	$q_1^{a,n}$	0	0	0	$q_5^{a,n}$	$q_6$	0	н	$\alpha_5$	$\beta_5$
1 – 7	$q_1^{a,n}$	0	$q_3^{a,n}$	$q_4$	0	0	0	н	$\alpha_7$	$\beta_7$

Ймовірності  $Q(m_n)$ ,  $\alpha(m_n)$ ,  $\beta(m_n)$  визначають ФМ і відповідні їм ймовірності. Підсумувавши їх, можна підрахувати ймовірності  $Q(m_n)$ ,  $\alpha(m_n)$ ,  $\beta(m_n)$  відповідно.

В табл. 4.9 і 4.10 наведені комбінації станів ФМ і відповідні їм ймовірності. Підсумувавши їх, також можна підрахувати ймовірності  $Q(m_n)$  для модулів ФМ 4 і ФМ 6.

Очевидно, що  $q_j^{a,n} \ll q_j$ , тому з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна вважати, що для  $j$ -го ФМ  $Q(m_n) = q_j$ . Тоді формула 4.16 набере вигляду:

$$q_j^{a,n} = \frac{q_j - \beta(m_n)}{q_j + \alpha(m_n) - \beta(m_n)}. \quad (4.17)$$

Таблиця 4.9

ФМ4

ФМ1	ФМ2	ФМ3	ФМ4	ФМ6	$Q_i$
-	-	-	Н	-	$q_4$
Н	Н	-	П	-	$q_1^{a,n} q_2^{a,n} (1 - q_4)$
Н	-	-	П	Н	$q_1^{a,n} (1 - q_4) q_6$
-	Н	Н	П	-	$q_2^{a,n} q_3^{a,n} (1 - q_4)$
Н	Н	Н	П	Н	$-q_1^{a,n} q_2^{a,n} q_3^{a,n} (1 - q_4) q_6$

Таблиця 4.10

ФМ6

ФМ1	ФМ2	ФМ4	ФМ5	ФМ6	$Q_i$
-	-	-	-	Н	$q_6$
Н	Н	-	-	П	$q_1^{a,n} q_2^{a,n} (1 - q_6)$
Н	-	Н	-	-	$q_1^{a,n} q_4$
-	Н	-	Н	П	$q_1^{a,n} q_5^{a,n} (1 - q_6)$
Н	Н	Н	П	Н	$-q_1^{a,n} q_2^{a,n} q_4^{a,n} q_6 (1 - q_5^{a,n})$

Таким чином, алгоритм визначення ФМ, які підлягають заміні (ремонт), має таку послідовність.

1. За характеристиками точності і надійності елементної бази і електричної схеми для кожного ФМ, який приймає участь в самоконтролі, визначають апіорну ймовірність відмови на момент часу  $t_n$ .

2. В момент часу  $t_i < t_n$  ( $i = \overline{1, k}$ ) проводиться самоконтроль автоматичних засобів контролю.

3. Для кожного параметра самоконтролю за методикою, викладеною у розділі 4.2, прогнозують його значення для моменту часу  $t_n$  і визначають результат прогнозування – “придатний”, “непридатний”.

4. По кожному параметру самоконтролю визначають помилки прогнозування: ризик виробника і ризик замовника.

5. Для ФМ, які входять до каналу самоконтролю і визнані працездатними на момент часу  $t_n$ , визначають апостеріорні ймовірності відмови  $q_j^{a,n}$  ( $j = \overline{1, k_n}$ ).

6. З урахуванням отриманих значень  $q_j^{a,n}$  визначають апріорні ймовірності відмови  $q_j^{a,n}$  ( $j = \overline{1, k_n}$ ) модулів, які входять до каналів самоконтролю і результат прогнозування параметрів яких виявився “непридатний”.

7. Методом експертних оцінок, з урахуванням результатів аналізу статистичних даних, накопичених під час експлуатації зразків АЗК з подовженим терміном служби, призначається нижня межа допустимого значення апостеріорної ймовірності відмови ФМ для моменту часу  $t_n - q_{np}^a$ .

8. Ті ФМ, для яких  $q_j^{a,n} > q_{np}^a$  або  $q_j^{a,n} > q_{np}^a$ , підлягають заміні (ремонту).

Зробимо розрахунок і визначимо ФМ, які підлягають заміні, для вихідних даних (див. табл. 4.3) при  $q_j = 0,2$ ; ( $j = \overline{1,7}$ )  $\alpha_i = \beta_i = 0,005$  ( $i = \overline{1,7}$ ),  $q_{np}^a = 0,5$ .

Результати розрахунків запишемо в табл. 4.11.

Таблиця 4.11

ФМ <sub>j</sub>	$M_n$ ( $m_n$ )	$K_n$ ( $k_n$ )	$\alpha(m_n) = \beta(m_n)$ $\alpha(m_n) = \beta(m_n)$	$Q(m_n)$ $Q(m_n)$	$q_j^{a,n}$ ( $q_j^{a,n}$ )	Рішення про заміну (так, ні)
ФМ1	3	5	0,01	0,258	0,01	ні
ФМ2	3	5	0,01	0,232	0,011	ні
ФМ3	1	3	0,005	0,488	0,04	ні
ФМ4	2	5	0,0075	0,2	0,96	так
ФМ5	2	5	0,0075	0,387	0,006	ні
ФМ6	2	5	0,0075	0,2	0,96	так
ФМ7	2	5	0,0075	0,036	0,007	ні

## Методичні вказівки

Прогнозування технічного стану АЗК є надзвичайно важливим для забезпечення високої ефективності використання техніки, оскільки воно спрямоване не тільки на виявлення, але й, головним чином, на попередження відмов – на підвищення надійності.

У главі викладено необхідні дані, якими слід скористатися для вивчення основних методів прогнозування технічного стану АЗК. Слід звернути увагу на сутність, переваги і недоліки методу канонічного розкладення випадкового процесу, індуктивного методу самоорганізації та методу оптимальної фільтрації. Особливу увагу слід звернути на методику й послідовність прогнозування технічного стану АЗК.

При визначенні основних частин АЗК, які підлягають заміні за результатами прогнозування, важливо визначити алгоритми і методи пошуку несправностей: алгоритми, що використовують параметри надійності (алгоритм, який мінімізує відношення ймовірності відмови елемента до часу перевірки; алгоритм, який розглядає пошук несправностей як поглинаючий марковський ланцюг); інформаційний алгоритм, метод гілок і меж.

Слід розглянути особливості АЗК як об'єкта діагностування, звернувши увагу на технологію і алгоритм визначення переліку функціональних модулів, які підлягають заміні або відновленню.

## Запитання для самоперевірки

1. В чому полягає сутність вибору математичної моделі прогнозування технічного стану АЗК?
2. Назвіть основні методи прогнозування технічного стану АЗК.
3. Які переваги та недоліки методу канонічного розкладення випадкового процесу ви знаєте?
4. Розкажіть про індуктивний метод самоорганізації, який використовується при прогнозуванні АЗК.

5. В чому полягає сутність методу оптимальної фільтрації при прогнозуванні АЗК?
6. Викладіть існуючу методику прогнозування технічного стану АЗК.
7. Сформулюйте загальну постановку задачі локалізації дефектних складових частин апаратури.
8. Які ви знаєте алгоритми й методи пошуку несправностей АЗК?
9. Яку задачу необхідно вирішити при діагностуванні АЗК в режимі самоконтролю?
10. Яким чином визначають перелік функціональних модулів, які підлягають заміні або відновленню?
11. Розкажіть про ризики виробника і замовника. Яким чином вони визначаються?
12. Дайте визначення функціональних модулів, які підлягають заміні (ремонту).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1985. – 90 с.
2. ДСТУ 3589-97. Системи та комплекси авіаційного обладнання. Надійність та експлуатація. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1998. – 25 с.
3. БЕРЕЗИН Н.С., ЖИДКОВ И.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962. – 464 с.
4. ВЕРЗАКОВ Г.Ф., КИШТ Н.В., РАБИНОВИЧ В.Н., ТИМОНЕН Л.С. Введение в техническую диагностику. – М.: Энергия, 1968. – 224 с.
5. ГНЕДЕНКО Б.В., БЕЛЯЕВ Ю.К., СОЛОВЬЕВ А.Д. Математические методы в теории надежности – М.: Наука, 1965. – 524 с.
6. ФОМИН А.В. и др. Расчет электрических допусков на параметры радиоизделий, учитывающих влияние температуры, влаги и старения. – К.: Знание, 1965. – 34 с.
7. ДРУЖИНИН Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоиздат, 1986. – 480 с.
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ сложных систем. “Кибернетика”, сб. науч. тр. Ред. А.Г. Ивахненко. – К.: Ин-т кибернетики, 1985. – 73 с.
9. КУБАРЕВ А.И. Надежность в машиностроении. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 229 с.
10. КУДРИЦКИЙ В.Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. – К.: Техніка, 1982. – 168 с.
11. КУДРИЦКИЙ В.Д., СИНИЦА М.А., ЧИНАЕВ П.И. Автоматизация контроля РЭА. – М.: Сов. радио, 1977. – 255 с.
12. КУЗНЕЦОВ П.И., ПЧЕЛИНЦЕВ Л.А., ГАЙДЕНКО В.С. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах. – М.: Сов. радио, 1969. – 240 с.
13. МОЗГАЛЕВСКИЙ А.В., ГАСКАРЕВ Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
14. ПОЛОВКО А.М. Основы теории надежности. – М.: Наука, 1964. – 446 с.
15. СИЛИН Б.Б., ЗАКОВРЯШИН А.И. Автоматическое прогнозирование состояния аппаратуры управления и наблюдения. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.



## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Показчик побудовано за алфавітним принципом розміщення рубрик. Він адресує читача в основному до тих сторінок навчального посібника де наведена інформація по сутності терміну. Коли для одного і того ж терміну вказуються дві та більше сторінок, то це відповідає випадкам розширення або конкретизації понять, які розглядаються. Якщо рубрику становить поєднання прикметника і іменника, то, як правило, застосовується інверсія, тобто іменник поставлено на перше місце, оскільки це полегшує знаходження об'єкта, поняття.

При необхідності написання на початку наступної рубрики відповідних слів попередньої рубрики ці слова замінюються однаковою кількістю рисок „-”.

### **А**

Аванпроект 18

Алгоритми пошуку несправності 58-60, 70-71

### **Б**

Безвідмовність 6, 13-15, 17, 24, 41-42, 45, 49

Безпека АЗК 14

### **В**

Випробування АЗК державні 28

-- на безвідмовність 28, 36

--- довговічність 28-29

--- вплив зовнішніх чинників 28-29, 36

Відмова 7, 30

- поступова 22-23

- раптова 22-23

- самоусувна 32-34, 36

Відмови апаратури переміжні 12

Відхилення середньоквадратичне 23, 25, 55-57, 62

Властивості матеріалів фізико-хімічні 10

## **Д**

Довговічність АЗК 3-7, 16-19, 24-26, 28, 30, 35-37, 39-42, 49-50

Документація експлуатаційна 14, 17, 38, 41-42, 49

– конструкторська 14, 17

– нормативно-технічна 18-19, 36-37, 43

– ремонтна 46

Доробки АЗК 41

Достовірність контролю 5, 16-17, 42

– абсолютна 5

– інструментальна 5, 14, 16, 28, 35, 44

## **Е**

Етап нормальної експлуатації АЗК 12

– припрацювання 12

– фізичного старіння і зношення АЗК 12

## **З**

Завадостійкість 5

Завдання технічне 18, 28, 30, 35

Заміна складових частин (елементів) 39, 45-47, 49, 59-60, 62-63, 68-71

Збережність 6-7, 19, 28, 40

Зношення АЗК 11

– електроерозійне 11

– фізичне 11-12

## **І**

Інтенсивність відмов 22-23

## **К**

Коефіцієнт готовності АЗК 6

Контроль стану АЗК 41

– інструментальний 41

Критерій граничного стану АЗК 4, 13-14, 16, 28, 30

– збережності 35

– мінімуму питомих витрат 33

## **М**

- Метод визначення стану АЗК експертний 15
  - експертних оцінок 63, 69
  - канонічного розкладання випадкового процесу 51, 70
  - найменших квадратів 32, 53
  - оптимальної фільтрації 52-53, 71
  - самоорганізації індуктивний 51-52, 70
- Методи прогнозування технічного стану об'єкта 51-53, 70
  - самоконтролю 5
- Методики прогнозування технічного стану АЗК 4
- Міцність матеріалу електрична 11

## **Н**

- Надійність 3, 6, 16-17, 24, 41-42, 70
  - об'єкта контролю 5
- Напрацювання мінімальне 18-21, 35, 37
  - на відмову середнє 15

## **О**

- Обслуговування технічне 14-15, 43-44
- Огляд АЗК технічний 15, 43-47, 56
- Ознаки граничного стану 13, 17

## **П**

- Параметр апаратури (елемента) визначальний 23, 26, 36, 40
  - контрольований 5-6
  - потоку відмов 12, 15, 17, 22-23, 30-32, 34, 41-42
- Періодичність перевірки параметрів АЗК 40, 49
- Повнота контролю 5
- Помилка другого роду 5
  - першого роду 5
- Послідовність прогнозування технічного стану АЗК 56-57, 70
- Похибка середньоквадратична 52-53
- Працездатність АЗК 3
- Продовження ресурсу АЗК 42-45, 49-50
- Продовження терміну служби АЗК 42-50
- Продуктивність АЗК 6

Проектування ескізне 18  
– технічне 18

## **Р**

Ремонт капітальний 7  
– поточний 14, 16, 41, 44  
– регламентований 7  
– середній 7, 44-47, 50  
Ремонтопридатність 6-7, 38  
Ресурс 8, 21, 29-30, 38, 40, 42-43, 47  
– гамма-відсотковий 7-8, 9, 18, 37  
– призначений 7-10, 19, 21-24, 30, 32, 35, 37-39  
– середній 7-8, 10, 18, 25-27, 29-30, 37  
Ризик виробника 5-6, 61, 63-64, 66-68, 71  
– замовника 5-6, 61, 63-64, 66-68, 71  
Рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу 5  
Розподіл нормальний експоненціальний 22  
– – зрізаний 22

## **С**

Склад контрольованих параметрів 5  
Самоконтроль АЗК 14-15, 29, 42, 44-45, 49, 51, 55-60  
Списання АЗК 46  
Сподівання математичне безвідмовної роботи 23  
Стан граничний 7, 9, 13-17, 20, 24-26, 28-30, 33, 35, 43, 45-46  
– АЗК технічний 9, 43, 45-46, 60, 62  
Старіння матеріалів і сплавів 10  
– моральне 10,12  
– напівпровідників 10  
– полімерів 11  
– фізичне 10  
Схема самоконтролю АЗК трактова 60-61

## **Т**

Таблиця станів 59  
Термін служби 8, 27-30, 36, 38-40, 42-43  
– – гамма-відсотковий 7  
– – мінімальний 18-20, 35, 37

- призначений 7-10, 28, 30, 32, 35, 37, 39
- середній 7, 10, 18, 25, 27, 29-30, 37

## **У**

- Умови експлуатації 10
- технічні 14, 18, 26-28, 30

## **Ф**

- Фонд ремонтного підприємства обмінний 46

## **Ч**

- Чинник достовірності контролю 5

## **Ш**

- Швидкодія АЗК 6

## **Щ**

- Щільність розподілу ресурсу 8
- терміну служби 8
- часу безвідмовної роботи 22-25

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	3
<b>ГЛАВА 1. ДОВГОВІЧНІСТЬ АЗК</b> .....	5
1.1. Показники якості АЗК.....	5
1.2. Показники довговічності АЗК.....	7
1.3. Чинники, які впливають на довговічність АЗК.....	10
1.4. Критерії граничного стану АЗК.....	13
Методичні вказівки.....	16
Запитання для самоперевірки.....	16
<b>ГЛАВА 2. ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОВГОВІЧНОСТІ АЗК</b> .....	18
2.1. Методи оцінювання показників довговічності АЗК на стадії розробки.....	18
2.1.1. Поелементний аналіз.....	18
2.1.2. Оцінювання призначеного ресурсу АЗК за даними про зміну визначальних параметрів ЕРЕ.....	22
2.1.3. Визначення показників довговічності АЗК через показники довговічності складових частин.....	24
2.1.4. Розрахунок похибок.....	26
2.1.5. Натурні випробування.....	28
2.2. Методи оцінювання показників довговічності АЗК на етапі експлуатації.....	30
2.2.1. Визначення показників довговічності АЗК за статистичними даними експлуатації.....	30
2.2.2. Економічний аналіз.....	32
Методичні вказівки.....	35
Запитання для самоперевірки.....	36
<b>ГЛАВА 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АЗК</b> .....	37
3.1. Методи забезпечення довговічності АЗК на етапі розробки.....	37
3.1.1. Вибір елементної бази.....	37
3.1.2. Комплектування запасними елементами.....	38
3.1.3. Примусова заміна елементів.....	39
3.1.4.Періодичне регулювання.....	40
3.2. Методи забезпечення й підвищення довговічності на етапі експлуатації.....	41

3.2.1. Зменшення періодичності технічного обслуговування.....	41
3.2.2. Організація робіт для продовження ресурсу (терміну служби).....	42
Методичні вказівки.....	49
Запитання для самоперевірки.....	49
<b>ГЛАВА 4. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО</b>	
<b>СТАНУ АЗК.....</b>	<b>51</b>
4.1. Вибір математичної моделі прогнозування.....	51
4.2. Методика прогнозування технічного стану АЗК.....	53
4.3. Визначення основних частин АЗК, які підлягають заміні за результатами прогнозування*.....	58
4.3.1. Аналіз методів локації дефектних складових частин апаратури.....	58
4.3.2. Особливості АЗК як об'єкта діагностування.....	60
Методичні вказівки.....	70
Запитання для самоперевірки.....	70
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>72</b>
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....</b>	<b>73</b>