



**НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ**

**Надійність техніки.  
ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ  
ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ (ТЕРМІНУ СЛУЖБИ)  
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

**ДСТУ**

*Видання офіційне*

**Київ**

**ДП «УкрНДНЦ»**

**2015**

## ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАНУ)

РОЗРОБНИКИ: **В. Стрельніков**, д.т.н. (науковий керівник), **А. Федухін**, д.т.н., **П. Стрельніков**, **М. Редковська**, **Є. Лічман**

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ ДП «УкрНДНЦ» від №.....

3 Національний стандарт

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

---

**Право власності на цей документ належить державі.  
Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати його повністю чи частково  
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.  
Стосовно регулювання прав власності треба звертатися до ДП «УкрНДНЦ»**

ДП «УкрНДНЦ», 2015

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ . . . . .   | V  |
| 1 Сфера застосування . . . . .  | 1  |
| 2 Терміни та визначення понять . . . . .  | 2  |
| 3 Познаки і скорочення . . . . .  | 6  |
| 4 Основні положення . . . . .   | 9  |
| 5 Оцінка залишкового ресурсу невідновних об'єктів на основі статистичної інформації про відмови . . . . .                                     | 17 |
| 5.1 Прогнозування залишкового ресурсу за наявності відмов експлуатованих об'єктів при використанні <i>DM</i> - розподілу . . . . .            | 17 |
| 5.2 Прогнозування залишкового ресурсу за наявності відмов експлуатованих об'єктів при використанні <i>DN</i> - розподілу . . . . .            | 19 |
| 5.3 Прогнозування залишкового ресурсу за відсутності відмов експлуатованих, одиничних зразків при використанні <i>DM</i> -розподілу . . . . . | 21 |
| 5.4 Прогнозування залишкового ресурсу за відсутності відмов експлуатованих, одиничних зразків при використанні <i>DN</i> -розподілу . . . . . | 23 |
| 6 Оцінка залишкового терміну служби відновлюваних об'єктів на основі статистичної інформації про відмови . . . . .                            | 25 |
| 6.1 Визначення параметрів розподілу напрацювання на відмову за спостережуваний інтервал при використанні <i>DM</i> -розподілу . . . . .       | 25 |
| 6.2 Визначення параметрів розподілу напрацювання на відмову за спостережуваний інтервал при використанні <i>DN</i> -розподілу . . . . .       | 26 |
| 6.3 Оцінки параметрів $\mu^*$ і $\nu^*$ розподілу напрацювання між ушкодженнями певного типу (чи ушкоджень будь-якого типу) . . . . .         | 27 |
| 6.4 Обчислення залишкового терміну служби . . . . .   | 27 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 7   | Оцінка залишкового ресурсу на основі виміру ресурсних або діагностичних параметрів . . . . .  | 29 |
| 7.1 | Оцінка і прогнозування залишкового ресурсу при вимірі ресурсного (визначального) параметра . . . . .                                | 29 |
| 7.2 | Оцінка і прогнозування залишкового ресурсу при вимірі діагностичних параметрів . . . . .  | 31 |
| 8   | Встановлення регламентованого терміну подальшої експлуатації . . .  | 35 |
| 8.1 | Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для невідновних об'єктів при використанні <i>DM</i> -розподілу . . . . . | 35 |
| 8.2 | Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для відновлюваних об'єктів розподілу . . . . .                           | 36 |
| 8.3 | Визначення регламентного терміну подальшої експлуатації при використанні <i>DN</i> -розподілу . . . . .                             | 37 |
|     | Додаток А Рекомендації по визначенню коефіцієнта варіації . . . . .   | 39 |
|     | Додаток Б Таблиці для обчислення показників надійності . . . . .  | 42 |
|     | Додаток В Приклади застосування нормативного матеріалу . . . . .  | 45 |

## ВСТУП

Існуючі методики аналізу надійності устаткування типу «аналіз тренду потоку відмов», ґрунтовані на використанні однопараметричного експоненціального розподілу і передуючі прогнозуванню залишкового ресурсу (терміну служби) і призначенню регламентованого терміну експлуатації, є дуже грубі якісні оцінки і прогноз. Ці методики не призводять до кількісних оцінок показників надійності експлуатованого устаткування. Відсутні оцінки достовірності (довірчій вірогідності) і точності (відносної помилки) як визначуваних, так і прогнозованих показників надійності устаткування. Сама гіпотеза, що лежить в основі методу «аналіз тренду», суперечить елементарному фізичному поняттю про знос і старіння будь-якого устаткування при тривалій експлуатації.

Справжня методика розроблена на основі використання найбільш адекватних імовірісно-фізичних моделей відмов (дифузійних розподілів) і дозволяє ефективно вирішувати поставлену задачу, використовуючи апріорну інформацію про фізичні процеси деградації, об'єктів, що обумовлюють відмови, і прогнозувати залишковий ресурс (термін служби) в умовах малої або навіть відсутності статистики відмов. При цьому усі кількісні оцінки показників надійності (поточні показники надійності устаткування, що прогноуються залишковий ресурс (термін служби) і регламентований термін експлуатації) мають оцінки достовірності і точності, що відповідають статистичним даним, що отримуються за певний інтервал спостережень.



# НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

## НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ (ТЕРМІНУ СЛУЖБИ) ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

## НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИКИ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА (СРОКА СЛУЖБЫ) ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## SAFETY EQUIPMENT EVALUATION AND PREDICTION RESIDUAL LIFE (LIFE) TECHNICAL SYSTEMS

---

Чинний від

### 1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт поширюється на механічне і тепломеханічне устаткування (двигуни, насосні агрегати, арматуру, посудини, трубопроводи і інші вироби), електронне і електротехнічне устаткування (системи контролю і управління, електродвигуни, турбогенератори, компресори, трансформатори, вимикачі і інші вироби) і їх складові частини, які розглядаються з точки зору надійності як самостійні одиниці, а також на інші технічні об'єкти устаткування (далі - об'єкти). Стандарт встановлює основні положення за процедурою оцінки і прогнозування залишкового ресурсу, а також встановлює необхідні умови при використанні цього показника для вирішення питання про терміни подальшої експлуатації.

Цей стандарт може бути використан для прогнозування залишкового напрацювання до відмови, залишкового терміну служби об'єктів і встановлення регламентованого терміну подальшої експлуатації. Вибір планів і об'ємів випробувань і (чи) спостережень в процесі експлуатації роблять в установленому порядку.

## **2 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ**

Вживані в цьому стандарті поняття, терміни і їх визначення відповідають ДСТУ 2860.

На додаток до них використовуються наступні визначення:

### **2.1 відмова**

Подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкту, тобто у втраті об'єктом здатності виконувати необхідну функцію.

**Примітка.** Причиною відмови можуть бути досягнення об'єктом граничного стану або поява несправності, що призводить до нездатності об'єкту виконувати необхідні функції

### **2.2 ресурсний (визначальний) параметр**

Параметр (характеристика), досягнення яким деякого критичного (граничного) значення призводить до відмови об'єкту

### **2.3 діагностичний параметр**

Параметр (характеристика), який може бути вимірний в процесі експлуатації об'єкту і який побічно характеризує витрачання ресурсу об'єкту

### **2.4 залишковий ресурс**

Сумарне напрацювання об'єкту від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан.



**Примітка.** Аналогічно вводяться поняття залишкового напрацювання до відмови, залишкового терміну служби і залишкового терміну зберігання

### **2.5 середній залишковий ресурс ( $\pi(\tau)$ )**

Математичне очікування залишкового ресурсу (напрацювання) після часу  $\tau$  (моменту контролю його технічного стану)

### **2.6 гамма-процентний залишковий ресурс $\pi_\gamma(\tau)$**

Напрацювання, починаючи з деякого моменту часу  $\tau$  (моменту контролю його технічного стану) впродовж якої об'єкт, що безвідмовно пропрацював, матиме значення умовної вірогідності безвідмовної роботи

$$\frac{P[\tau + \pi_\gamma(\tau)]}{P(\tau)} \text{ рівне } \gamma$$

### **2.7 регламентований термін експлуатації**

Календарна тривалість експлуатації устаткування, регламентована показниками довговічності в нормативній документації на неї.

**Примітка.** Після закінчення регламентованого терміну експлуатації виконують усі необхідні роботи для оцінки технічного стану і встановлення реального рівня надійності і за відповідних умов може бути встановлений новий регламентований термін експлуатації

### **2.8 ушкодження**

Подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкту при збереженні працездатного стану

### **2.9 граничний стан**

Стан об'єкту, при якому його подальша експлуатація недопустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе або недоцільне.

**Примітка.** Граничний стан настає, наприклад, тоді, коли параметр потоку відмов стає неприйнятним і (чи) об'єкт вважають неремонтопридатним в результаті несправності

### **2.10 критерій граничного стану**

Ознака або сукупність ознак граничного стану об'єкту, встановлені нормативно-технічною і (чи) конструкторською (проектною) документацією.

**Примітка.** Залежно від умов експлуатації для одного і того ж об'єкту можуть бути встановлені два і більше критеріїв граничного стану

### **2.11 цензурування справа (цензурування)**

Подія, що призводить до припинення випробувань або експлуатаційних спостережень об'єктів до настання відмови (граничного стану).

**Примітка.** Причинами цензурування є:

- різночасність почала і (чи) закінчення випробувань або експлуатації об'єкту;
- зняття з випробувань або експлуатації деяких об'єктів з організаційних причин або із-за відмов складових частин, надійність яких не досліджується;
- переклад об'єктів з одного режиму застосування в інший в процесі випробування або експлуатації;
- необхідність оцінки надійності до настання відмов усіх випробовуваних об'єктів

### **2.12 напрацювання до цензурування**

Напрацювання об'єкту від початку випробувань або експлуатаційних спостережень до настання цензурування

### **2.13 цензурована вибірка**

Вибірка, елементами якої є значення напрацювання до відмови і напрацювання до цензурування

### **2.14 одноразово цензурована вибірка**

Цензурована вибірка, в якій значення напрацювань до цензурування рівні між собою і не менше найбільшого напрацювання до відмови

**2.15 багаторазово цензурована вибірка**

Цензурована вибірка, в якій значення напрацювань до цензурування не рівні між собою

**2.16 параметр масштабу**

Параметр функції розподілу напрацювання до відмови (на відмову), що характеризує розташування розподілу на тимчасовій осі

**2.17 параметр форми**

Параметр функції розподілу напрацювання до відмови (на відмову), характеризуючий вид і форму розподілу

**2.18 план випробувань [NUr]**

План випробувань, згідно з яким одночасно починають випробування  $N$  зразків; зразки, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, випробування припиняють, коли число зразків, що відмовили, досягає  $r$

**2.19 план випробувань [NUT]**

План випробувань, згідно з яким одночасно випробовують  $N$  зразків; зразки, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, випробування припиняють після закінчення часу випробувань або напрацювання  $T$  для кожного зразка, що не відмовив

**2.20 план випробувань [NRz]**

План випробувань, згідно з яким одночасно починають випробування  $N$  зразків; зразки, що відмовили під час випробувань, замінюють новими,

випробування припиняють, коли сумарне число зразків, що відмовили по усіх позиціях, досягає  $r$  або при витіканні часу випробувань або напрацювання  $T$

### 2.21 план випробувань [NMT]

План випробувань, згідно з яким одночасно випробовують  $N$  об'єктів; після кожної відмови об'єкт відновлюють; кожен об'єкт випробовують до витікання часу випробувань  $T$  або напрацювання до відмови

### 2.22 план випробувань [NMr]

План випробувань, згідно з яким одночасно випробовують  $N$  об'єктів; після кожної відмови об'єкт відновлюють; випробування припиняють, коли сумарне по усіх об'єктах число відмов досягло  $r$ .

**Примітка 1.** План випробувань [NUr] при  $r = N$  перетворюється на план [NUN] (повна вибірка).

**Примітка 2.** План випробувань [NRz] узагальнює плани випробувань [NRr] і [NRT].

**Примітка 3.** Букви  $N, U, R, M, T, r, z$  у позначеннях планів мають наступне смислове значення:  $N$  - об'єм вибірки виробів, призначених для випробувань;  $U$  - плани випробувань, в яких вироби, що відмовили, не замінюються і не відновлюються;  $R$  - вироби, що відмовили, замінюються новими;  $M$  - працездатність виробу відновлюється після кожної відмови (ці плани застосовуються для відновлюваних виробів при оцінці показників надійності типу середнє напрацювання на відмову або середній час відновлення);  $T$  - час випробувань або напрацювання до закінчення випробувань;  $r$  - число відмов або виробів, що відмовили;  $z$  - кожен виріб випробовують впродовж напрацювання  $z_i$ , де  $z_i = \min\{t_i, \tau_i\}$  (тут  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $t_i$  - напрацювання до відмови  $i$ -го виробу;  $\tau_i$  - напрацювання до зняття з випробувань працездатного  $i$ -го виробу).

## 3 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

$q$  - довірча вірогідність оцінки показника надійності, що відповідає двосторонньому довірчому інтервалу;

$q_1$  - довірча вірогідність оцінки параметра форми  $\nu$  (коефіцієнта варіації);

$q_2$  - довірча вірогідність оцінки параметра масштабу  $\mu$ ;

$\xi$  - гранична відносна помилка (відносна помилка) оцінки показника надійності  $R$ ;

$N$  - число випробовуваних (спостережуваних) об'єктів;

$r$  - число відмов (граничних станів) за час випробувань (спостережень);

$d$  - число відмов (граничних станів) за час випробувань (спостережень) за планом [NUT];

$m = d$ , якщо діє план [NUT] і  $m = r$  якщо діє план [NUr];

$t_i$  - окремі значення випадкової величини (напрацювання до відмови, напрацювання між відмовами), вимірювані в годинах, циклах і тому подібне;

$\tau_i$  - окремі значення напрацювання до цензурування, вимірювані в годинах, циклах і тому подібне;

$s_i$  - загальне напрацювання  $i$ -го зразка;

$S$  - сумарне напрацювання усіх випробовуваних зразків;

$T, t_u$  - тривалість випробувань (спостережень), вимірювана в годинах, циклах і тому подібне;

$\tilde{T}_{cp}$  - точкова оцінка середніх показників надійності  $T_{cp}$ ;

$T_1$  - середнє напрацювання до першої відмови об'єкту;

$T_2$  - середнє напрацювання на відмову (між відмовами);

$T_1^*$  - середнє напрацювання до першої появи першого ушкодження об'єкту;

$T_2^*$  - середнє напрацювання між ушкодженнями;

$\gamma$  - значення вірогідності у відсотках, з якою впродовж напрацювання не виникне відмова (досягнення граничного стану);

$\tilde{T}_\gamma$  - точкова оцінка гамма-процентних показників надійності  $T_\gamma$ ;

$\tilde{F}(t)$  - точкова оцінка функції розподілу  $F(t)$ ;

$\tilde{P}(t_3)$  - точкова оцінка вірогідності безвідмовної роботи за напрацювання  $t_3$ ;

$\underline{P}(t_3)$  - нижня довірча межа вірогідності безвідмовної роботи;

$\Phi(\cdot)$  - функція нормованого нормального розподілу;

$U_\gamma$  - квантиль нормального розподілу рівня  $\gamma$ ;

$DM(t; \mu, \nu)$  - позначення функції дифузійного монотонного розподілу ( $DM$  - розподілу);

$DN(t; \mu, \nu)$  - позначення функції дифузійного немонотонного розподілу ( $DN$  - розподілу);

$\tilde{\mu}, \tilde{\nu}, \underline{\mu}, \bar{\mu}$  - оцінки параметрів  $DM$ - і  $DN$ - розподілів;

$\mu^*, \nu^*$  - параметри розподілу напрацювання між ушкодженнями  $DM$  – і  $DN$  – розподілів;

$K_s$  - коефіцієнт інтенсивності експлуатації;

$\mu_0$  - параметр масштабу розподілу залишкового напрацювання до граничного стану (ресурсу);

$\nu_0$  - параметр форми розподілу залишкового напрацювання до граничного стану (ресурсу);

$T_{0cl}$  - середнє значення залишкового терміну служби;

$\mu_{cl}$  - параметр масштабу розподілу залишкового терміну служби;

$\nu_{cl}$  - параметр форми розподілу залишкового терміну служби;

$T_{ппр}$  - період часу між планово-запобіжними ремонтами;

$T_{дон}, T_{дон}^*$  - рівень середнього напрацювання, що допускається (граничний нижній), між відмовами (між ушкодженнями);

$\tau$  - момент експлуатації (сумарне напрацювання), на який роблять контроль технічного стану об'єкту, оцінку рівня реальної надійності і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби);

$\tilde{\pi}(\tau)$ ,  $\underline{\pi}(\tau)$ ,  $\bar{\pi}(\tau)$  - відповідно, вибіркова оцінка, нижня довірча і верхня довірча межі середнього залишкового ресурсу;

$\tilde{\pi}_\gamma(\tau)$ ,  $\underline{\pi}_\gamma(\tau)$ ,  $\bar{\pi}_\gamma(\tau)$  - відповідно, вибіркова оцінка, нижня довірча і верхня довірча межі гамма-процентного залишкового ресурсу;

$\theta_{\gamma p}(\tau)$  - регламентований термін подальшої експлуатації (після моменту  $\tau$ );

$x(F; \nu)$  - відносна (нормована) величина напрацювання залежно від значень функції розподілу (вірогідність відмови)  $F$  і значень коефіцієнта варіації  $\nu$  визначається з таблиць функцій  $DN$ -розподілу.

## 4 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

4.1 Залишковий ресурс (залишкове напрацювання до відмови, залишковий термін служби) є індивідуальними показниками надійності (довговічності, безвідмовності), що відбивають фактичну тривалість експлуатації певного об'єкту до моменту, коли об'єкт досягне граничного стану, відмовить або подальша експлуатація об'єкту недоцільна. Правила доцільності будуються за економічними критеріями і критеріями безпеки.

4.2 Граничний стан об'єкту може характеризуватися:

- переходом невідновного об'єкту в непрацездатний стан;
- зниженням ефективності використання об'єкту внаслідок погіршення надійності;
- економічною недоцільністю подальшої експлуатації;
- моральним старінням апаратури і устаткування.

4.3 В якості критерію настання граничного стану відновлюваних об'єктів використовують зниження середнього напрацювання між відмовами (ушкодженнями)  $T_2 (T_2^*)$  до мінімально допустимого рівня  $T_{дон} (T_{дон}^*)$ . Мінімальний допустимий рівень середнього напрацювання  $T_{дон} (T_{дон}^*)$  встановлюють, виходячи з міркувань безпеки і економічності.

4.3.1 Мінімальний допустимий рівень середнього напрацювання на відмову (між відмовами)  $T_{дон}$  можна встановити за узгодженням із замовником з рекомендованого ряду:  $0,75T_1$ ;  $0,5T_1$ ;  $0,33T_1$ ;  $0,25T_1$ .

Часто в практиці надійності використовують негостирований термін - «нормований рівень надійності». Наприклад  $T_{норм}$  - середнє напрацювання на відмову (між відмовами), що відповідає «нормі». Якщо встановлено значення  $T_{норм}$  вище приведеним або іншим яким-небудь чином, у такому разі приймають  $T_{дон} = T_{норм}$ .

4.3.2 Мінімальний допустимий рівень середнього напрацювання між ушкодженнями  $T_{дон}^*$  за узгодженням із замовником приймають  $T_{дон}^* \leq T_{ППР}$ .

4.4 Інформація про залишковий ресурс (залишковому напрацюванню до відмови) потрібна для використання в системі технічного обслуговування, а також для вироблень рішень про можливість подальшої експлуатації.

Надалі використовуватиметься термін "залишковий ресурс", при цьому усі методики оцінки і прогнозування залишкового ресурсу можуть бути використані для відповідних оцінок залишкового терміну служби і залишкового напрацювання до відмови об'єктів.

4.5 Для вироблення рішення про подальшу експлуатацію об'єкту, терміни і об'єми проведення ремонтних дій на основі інформації про залишковий ресурс необхідно визначати наступні величини:

- середній залишковий ресурс  $\pi(\tau)$ ;



- гамма-процентний залишковий ресурс  $\pi_{\gamma}(\tau)$ ;

- точність прогнозування показників залишкового ресурсу (довірчі межі, що відповідають визначеним довірчій вірогідності і відносній помилці).

Точність і достовірність прогнозованого значення залишкового ресурсу визначаються відхиленням прогнозованого значення від фактичного значення, отриманого при дослідженні на фактичному матеріалі.

4.6 Параметри і характеристики об'єкту, що використовуються як початкова інформація при прогнозуванні залишкового ресурсу, залежать від виду початкової інформації і вживаної методики прогнозування.

Параметрами і характеристиками, що несуть інформацію про індивідуальні особливості об'єкту, можуть бути:

- первинна оцінка довговічності цього типу об'єктів;
- напрацювання на момент прогнозування;
- значення ресурсного параметра на момент прогнозування;
- значення вимірюваних діагностичних параметрів об'єкту;
- переважаючі фізичні процеси деградації, що призводять до граничного стану;
- значення коефіцієнтів варіації фізичних процесів, що призводять до граничного стану, або коефіцієнтів варіації ресурсу об'єктів-аналогів.

4.7 Більшість ситуацій при прогнозуванні залишкового ресурсу можна об'єднати в дві групи (два підходи) залежно від виду і об'єму початкової інформації :

- ситуації, в яких необхідно здійснити обробку інформації про первинну оцінку показників надійності (довговічності), статистичній інформації про відмови експлуатованих об'єктів (аналогів) і інформації про напрацювання об'єкту, залишковий ресурс якого прогнозується;

- ситуації, в яких необхідно здійснити обробку інформації про результати виміру ресурсних або діагностичних параметрів.

4.8 Точність прогнозування залишкового ресурсу більшою мірою залежить від прийнятої функції розподілу залишкового ресурсу.

При дослідженні надійності устаткування традиційно розділяють на два класи об'єктів :

- механічне і тепломеханічне устаткування (двигуни, насосні агрегати, арматура, посудини, трубопроводи і інші вироби), переважаючими процесами руйнування, що призводять до відмов (граничному стану) яких, є безповоротні деградаційні процеси типу об'ємна і контактна втома, механічний знос, корозія і старіння;

- електронне і електротехнічне устаткування (системи управління і контролю, електродвигуни, турбогенератори, компресори, трансформатори, вимикачі і інші вироби), що містять електротехнічні і електронні компоненти, які в основному обумовлюють відмови приладів і апаратури.

В якості теоретичної моделі відмов механічного і тепломеханічного устаткування приймають дифузійний монотонний розподіл (*DM*- розподіл), а в якості теоретичної моделі відмов електронного і електротехнічного устаткування приймають дифузійний немонотонний розподіл (*DN*- розподілу).

4.9 Основні характеристики *DM*- розподілу :

Функція розподілу напрацювання до граничного стану:

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right), \quad (1)$$

де  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$  - нормований нормальний розподіл.

Щільність розподілу залишкового ресурсу :

$$r(t) = \frac{(t + \mu) \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{2vt\sqrt{2\pi\mu t} \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)} \quad \text{при } t \geq \tau. \quad (2)$$

Математичне очікування залишкового ресурсу :

$$\pi(\tau) = \frac{\left[\mu\left(1 + \frac{v^2}{2}\right) - \tau\right] \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) + \frac{\mu v^2}{2} \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) + \frac{v\sqrt{\mu\tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)}. \quad (3)$$

Гамма-процентний залишковий ресурс:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \left( 1 + \frac{v^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - v U_{\gamma^*} \sqrt{1 + v^2 U_{\gamma^*}^2 / 4} \right) - \tau, \quad (4)$$

де  $U_{\gamma^*}$  - квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $\gamma^*$ ;

$$\gamma^* = \gamma \cdot \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right).$$

4.10 Основні характеристики  $DN$  -розподілу.

Функція розподілу (напрацювання до першої відмови) :

$$F(t) = DN(t; \mu, v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(-\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{t + \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right). \quad (5)$$

Щільність розподілу залишкового напрацювання :

$$r(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right] \left[ \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) - \exp\left(-\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Математичне очікування залишкового ресурсу :

$$\pi(\tau) = \frac{(\mu - \tau)\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) + (\mu + \tau)\exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right)}. \quad (7)$$

Гамма-процентний залишковий ресурс:

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \cdot x(1 - \gamma^{**}; v) - \tau, \quad (8)$$

де  $\gamma^{**} = \gamma \left[ \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu\tau}}\right) \right];$

$x(1 - \gamma^{**}; v)$  визначають по значенням  $F = 1 - \gamma^{**}$  і  $v$  з таблиць  $DN$ - розподілу (таблиця Б.7) або з розв'язування наступного рівняння

$$1 - \gamma^{**} = \Phi\left(\frac{1 - x}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{1 + x}{v\sqrt{x}}\right).$$

4.11 При параметричному підході для визначення показників надійності необхідно за результатами випробувань (спостережень) знайти оцінки параметрів закону розподілу, що входять в розрахункову формулу визначуваного показника надійності, далі вчислити показники надійності на підставі отриманих оцінок параметрів закону розподілу. При експлуатаційних спостереженнях за результатами отриманих даних встановлюють точкові і граничні оцінки показників надійності, що відповідають спостережуваній відносній помилці і заданій довірчій вірогідності оцінки показників надійності (чи що відповідають спостережуваній довірчій вірогідності при заданій відносній помилці). Під оцінками показників надійності розуміють точкову і (чи) інтервальну (межі довірчого інтервалу, який із заданою вірогідністю містить істинне значення показника) оцінки показника.

При дослідженні механічного і тепломеханічного устаткування за результатами випробувань і (чи) спостережень в першу чергу відомим чином

визначають точкову і граничні оцінки параметрів  $DM$  – розподілу  $(\tilde{\mu}, \underline{\mu}, \bar{\mu}, \tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$ .

Точкову оцінку і довірчі межі середнього залишкового ресурсу обчислюють по формулах:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{\left[ \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\mu} \tilde{\nu}^2}{2} \exp \left( \frac{2}{\tilde{\nu}^2} \right) \Phi \left( -\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\tau - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\nu}^2 \tilde{\mu} \tau} \right]}{\Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right)}; \quad (9)$$

$$\underline{\pi}(\tau) = \frac{\left[ \underline{\mu} \left( 1 + \frac{\underline{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\underline{\mu} - \tau}{\underline{\nu} \sqrt{\underline{\mu} \tau}} \right) + \frac{\underline{\mu} \underline{\nu}^2}{2} \exp \left( \frac{2}{\underline{\nu}^2} \right) \Phi \left( -\frac{\underline{\mu} + \tau}{\underline{\nu} \sqrt{\underline{\mu} \tau}} \right) + \frac{\underline{\nu} \sqrt{\underline{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\tau - \underline{\mu})^2}{2\underline{\nu}^2 \underline{\mu} \tau} \right]}{\Phi \left( \frac{\underline{\mu} - \tau}{\underline{\nu} \sqrt{\underline{\mu} \tau}} \right)}; \quad (10)$$

$$\bar{\pi}(\tau) = \frac{\left[ \bar{\mu} \left( 1 + \frac{\bar{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\bar{\mu} - \tau}{\bar{\nu} \sqrt{\bar{\mu} \tau}} \right) + \frac{\bar{\mu} \bar{\nu}^2}{2} \exp \left( \frac{2}{\bar{\nu}^2} \right) \Phi \left( -\frac{\bar{\mu} + \tau}{\bar{\nu} \sqrt{\bar{\mu} \tau}} \right) + \frac{\bar{\nu} \sqrt{\bar{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\tau - \bar{\mu})^2}{2\bar{\nu}^2 \bar{\mu} \tau} \right]}{\Phi \left( \frac{\bar{\mu} - \tau}{\bar{\nu} \sqrt{\bar{\mu} \tau}} \right)}. \quad (11)$$

Точкову оцінку і довірчі межі гамма-процентного залишкового ресурсу обчислюють по формулах:

$$\tilde{\pi}_\gamma(\tau) = \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U^2}{2} - \tilde{\nu} U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U^2 / 4} \right) - \tau; \quad (12)$$

$$\underline{\pi}(\tau) = \underline{\mu} \left( 1 + \frac{\underline{\nu}^2 U^2}{2} - \underline{\nu} U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \underline{\nu}^2 U^2 / 4} \right) - \tau; \quad (13)$$

$$\bar{\pi}_\gamma(\tau) = \bar{\mu} \left( 1 + \frac{\bar{\nu}^2 U^2}{2} - \bar{\nu} U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \bar{\nu}^2 U^2 / 4} \right) - \tau. \quad (14)$$

4.12 При дослідженні електронного і електротехнічного устаткування за результатами випробувань обчислюють точкові і граничні оцінки

параметрів  $DN$ -розподілу  $(\tilde{\mu}, \underline{\mu}, \bar{\mu}, \tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$  і отримують наступні оцінки показників надійності :

Точкова і граничні оцінки середнього залишкового ресурсу :

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\tilde{\mu} - \tau)\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}\tau}}\right) + (\tilde{\mu} + \tau)\exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}\tau}}\right)} ; \quad (15)$$

$$\underline{\pi}(\tau) = \frac{(\underline{\mu} - \tau)\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - \tau}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}\tau}}\right) + (\underline{\mu} + \tau)\exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + \tau}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - \tau}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + \tau}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}\tau}}\right)} ; \quad (16)$$

$$\bar{\pi}(\tau) = \frac{(\bar{\mu} - \tau)\Phi\left(\frac{\bar{\mu} - \tau}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}\tau}}\right) + (\bar{\mu} + \tau)\exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\bar{\mu} + \tau}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\bar{\mu} - \tau}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}\tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\Phi\left(-\frac{\bar{\mu} + \tau}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}\tau}}\right)} . \quad (17)$$

Точкова і граничні оцінки гамма-процентного залишкового ресурсу :

$$\tilde{\pi}_\gamma(\tau) = \tilde{\mu} \cdot x(1 - \gamma^{**}; \tilde{\nu}) - \tau ; \quad (18)$$

$$\underline{\pi}_\gamma(\tau) = \underline{\mu} \cdot x(1 - \gamma^{**}; \underline{\nu}) - \tau ; \quad (19)$$

$$\bar{\pi}_\gamma(\tau) = \bar{\mu} \cdot x(1 - \gamma^{**}; \bar{\nu}) - \tau . \quad (20)$$

## 5 ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ НЕВІДНОВНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ВІДМОВИ

### 5.1 Прогнозування залишкового ресурсу за наявності відмов експлуатованих зразків при використанні $DM$ -розподілу.

5.1.1 Оцінка параметрів  $DM$ -розподілу при планах спостереження [NUR] чи [NUT].

5.1.1.1 При малому числі відмов ( $r \leq 6, d \leq 6$ ) значення параметра форми  $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$   $DM$ -розподілу визначають згідно з Додатком А.

5.1.1.2 Визначення параметра масштабу  $\mu$   $DM$ -розподілу.

За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по не збуванню сумарних напрацювань до відмови (граничного стану):  $t_1, t_2, \dots, t_r$  ( $t_1, t_2, \dots, t_d$ ) і обчислюють значення емпіричної функції розподілу напрацювання в кожен момент  $t_j$  варіаційного ряду ( $j = 1, 2, \dots, m; m = r$  чи  $m = d$ ) по формулі:

$$F_j = j/N. \quad (21)$$

5.1.1.3 Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу  $\mu$   $DM$ -розподілу по формулі (метод квантилів):

$$\tilde{\mu} = \left[ \sum_j^m t_j (1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 2 - \tilde{\nu} U_{F_j} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 4}) \right] / m, \quad (22)$$

де  $F_j$  - емпірична функція вірогідності відмови на момент  $t_j$ ;

$U_{F_j}$  - квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $F_j$ .

Довірчі межі параметра масштабу  $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$  обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} \left[ 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2m} - \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{m}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / m} \right]; \quad (23)$$

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} \left[ 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2m} + \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{m}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / m} \right]. \quad (24)$$

де  $U_q$  - аргумент функції нормованого нормального розподілу (квантиль рівня  $q$ ) визначають по таблиці Б.1.

5.1.1.4 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників залишкового ресурсу згідно 4.11.

5.1.2 Оцінка параметрів  $DM$ -розподілу при планах спостереження [NRr] чи [NRT].

5.1.2.1 При малому числі відмов ( $r \leq 6$ ,  $d \leq 6$ ) значення параметра форми ( $\tilde{\nu}$ ,  $\underline{\nu}$ ,  $\bar{\nu}$ )  $DM$ -розподілу визначають згідно з Додатком А.

5.1.2.2 Визначення параметра масштабу  $\mu$   $DM$ -розподілу.

За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань до відмови і до цензурування:  $(t_1, t_2, \dots, t_r, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ . При цьому вибирають число інтервалів  $w$  не менше  $r$  якщо  $r \leq 6$ . Якщо  $r > 6$  то вибирають число інтервалів близько 7...10. Граничними значеннями інтервалів можуть бути як  $t_j$  так і  $\tau_j$ . Потім повний інтервал спостережень розбивають на інтервали, значення і число яких обумовлюються міркуваннями адекватнішої оцінки емпіричної функції розподілу на усій ділянці спостережень.

Визначають значення емпіричної функції розподілу в кожен момент  $t_j$  ( $\tau_j$ ) варіаційного ряду по формулі:

$$F_j = F_{j-1} + (1 - F_{j-1}) \frac{r_j}{\left[ N + r - \sum_{i=1}^{j-1} (r_i + n_i) \right]}, \quad (25)$$



де  $r_{j(i)}, n_{j(i)}$  - відповідно число відмов (повних напрацювань) і число неповних напрацювань в  $j(i)$  інтервалі ( $j = 1, 2, \dots, w$ );  $r$  - число заміненних зразків.

Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу  $\tilde{\mu}$  по формулі :

$$\tilde{\mu} = \left[ \sum_{j=1}^w k_j t_j \left( 1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 2 - \tilde{\nu} U_{F_j} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 4} \right) \right] / \sum_{j=1}^w k_j \quad (26)$$

де  $k_j$  - число співпадаючих напрацювань до відмови на  $j$ -му інтервалі;

$F_j$  - емпірична функція вірогідності відмови на момент  $t_j(\tau_j)$ ;

$U_{F_j}$  - квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $F_j$ ;

5.1.2.3 Довірчі межі параметра масштабу  $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$  обчислюють по формулах (23), (24), в яких  $m = r$  чи  $m = d$ .

5.1.2.4 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників залишкового ресурсу згідно 4.11.

## 5.2 Прогнозування залишкового ресурсу за наявності відмов експлуатованих об'єктів при використанні $DN$ -розподілу.

5.2.1 Оцінка параметрів  $DN$ -розподілу при планах спостереження [NUR] чи [NUT].

При малому числі відмов ( $r \leq 6, d \leq 6$ ) значення параметра форми  $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$   $DN$ -розподілу визначають згідно Додатку А.

Визначення параметра масштабу  $\mu$   $DN$ -розподілу.

За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань до відмови (граничного стану) :  $t_1, t_2, \dots, t_r$  ( $t_1, t_2, \dots, t_d$ ) і обчислюють значення емпіричної функції розподілу напрацювання в кожен момент  $t_j$  варіаційного ряду ( $j = 1, 2, \dots, m; m = r$  или  $m = d$ ) по формулі (21).

Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу  $\mu$   $DN$ -розподілу за формулою (метод квантилів) :

$$\tilde{\mu} = \left\{ \sum_{j=1}^m t_j [x(j/N; \tilde{\nu})]^{-1} \right\} / m. \quad (27)$$

Довірчі межі параметра масштабу ( $\underline{\mu}$ ,  $\bar{\mu}$ ) обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} x(1-q; \tilde{\nu}/\sqrt{m}); \quad (28)$$

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} x(q; \tilde{\nu}/\sqrt{m}). \quad (29)$$

Обчислюють показники залишкового ресурсу відповідно до 4.12.

5.2.2 Оцінка показників надійності при багатократному цензуруванні і наявності відмов для планів спостережень [NRr] і [NRT].

При малому числі відмов ( $r \leq 6$ ,  $d \leq 6$ ) значення параметра форми ( $\tilde{\nu}$ ,  $\underline{\nu}$ ,  $\bar{\nu}$ )  $DN$ -розподілу визначають згідно з Додатком А.

Визначення параметра масштабу  $\mu$   $DN$ -розподілу.

За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань до відмови і до цензуруванні:  $(t_1, t_2, \dots, t_r, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ , визначають значення емпіричної функції розподілу  $F_j$  у кожен момент  $t_j$  ( $\tau_j$ ) варіаційного ряду згідно (25).

Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу  $\tilde{\mu}$  по формулі:

$$\tilde{\mu} = \frac{\sum_{j=1}^w k_j t_j [x(F_j; \tilde{\nu})]^{-1}}{\sum_{j=1}^w k_j}, \quad (30)$$

де  $F_j$  - емпірична функція вірогідності відмови на момент  $t_j$  ( $\tau_j$ );

$k_j$  - число співпадаючих напрацювань до відмови на  $j$ -му інтервалі;

$w$  - число прийнятих інтервалів згідно з 5.1.2.2.

Довірчі межі параметра масштабу ( $\underline{\mu}$ ,  $\bar{\mu}$ ) обчислюють по формулах

(28), (29), в яких  $m = r$  чи  $m = d$ .

Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників залишкового ресурсу згідно з 5.12.

### 5.3 Прогнозування залишкового ресурсу за відсутності відмов експлуатованих, одиничних зразків при використанні *DM* -розподілу.

5.3.1 Якщо в експлуатації (під спостереженням) знаходяться одиничні зразки ( $N \geq 4$ ), те за відсутності відмов впродовж інтервалу напрацювання  $t_u = \tau$  оцінками залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) є:

Середнє значення очікуваного залишкового ресурсу :

$$\pi(\tau) = \frac{\left[ \mu \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\mu - \tau}{v \sqrt{\mu \tau}} \right) + \frac{\mu v^2}{2} \exp \left( \frac{2}{v^2} \right) \Phi \left( - \frac{\mu + \tau}{v \sqrt{\mu \tau}} \right) + \frac{v \sqrt{\mu \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\tau - \mu)^2}{2v^2 \mu \tau} \right]}{\Phi \left( \frac{\mu - \tau}{v \sqrt{\mu \tau}} \right)}. \quad (31)$$

Значення гамма-процентного залишкового ресурсу :

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \left( 1 + \frac{v^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - v U_{\gamma^*} \sqrt{1 + v^2 U_{\gamma^*}^2 / 4} \right) - \tau. \quad (32)$$

У виразах (31) і (32)  $\mu, v$  - оцінки параметрів первинного (розрахункового) розподілу напрацювання до граничного стану, отримані на етапі проектування (виробництва), а  $\gamma^*$  - визначається згідно 4.9.

5.3.2 Прогнозування залишкового ресурсу за відсутності відмов.

5.3.2.1 У разі, коли в експлуатації (під спостереженням) в течії напрацювання  $t_u = \tau$  знаходилася група ідентичних зразків ( $N \geq 4$ ) і не мала відмов, параметр форми ( $v$ ) визначають згідно Додатку А.

5.3.2.2 Визначають нижню межу вірогідності відсутності відмови за інтервал експлуатації (спостереження)  $t_u$  з таблиці 1 або обчислюють за формулою:

$$\underline{P}(t_u) = \left( \frac{1-q}{2} \right)^{1/N}. \quad (33)$$

Таблиця 1 - значення  $\underline{P}(t_u)$  залежно від  $N$  і  $q$ 

| $q$  | Значення $\underline{P}(t_u)$ для $N$ |        |        |        |        |        |        |
|------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | 4                                     | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 0,80 | 0,5623                                | 0,6310 | 0,6812 | 0,7198 | 0,7499 | 0,7745 | 0,7943 |
| 0,90 | 0,4729                                | 0,5493 | 0,6070 | 0,6519 | 0,6876 | 0,7169 | 0,7411 |
| 0,95 | 0,3976                                | 0,4782 | 0,5407 | 0,5905 | 0,6306 | 0,6640 | 0,6915 |
| 0,99 | 0,2659                                | 0,3466 | 0,4134 | 0,4692 | 0,5157 | 0,5554 | 0,5887 |

5.3.2.3 Обчислюють нижню довірчу межу параметра масштабу  $\mu$   $DM$  - розподілу по формулі:

$$\underline{\mu} = t_u \left( 1 + \frac{\bar{v}^2 U_{\underline{P}}^2}{2} + \bar{v} U_{\underline{P}} \sqrt{1 + \frac{\bar{v}^2 U_{\underline{P}}^2}{4}} \right) = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}), \quad (34)$$

де  $K_1(\underline{P}, \bar{v})$  - поправковий коефіцієнт, що враховує емпіричну вірогідність відсутності відмови;  $U_{\underline{P}}$  - аргумент функції нормального розподілу (квантиль рівня  $\underline{P}$ ) визначають з відповідних таблиць довідкової літератури або з таблиць Б.1-Б.2.

5.3.2.4 Використовуючи оцінку  $\underline{\mu}$ , що відповідає довірчій вірогідності  $q$ , отримують вибіркву середню оцінку параметра  $\tilde{\mu}$ :

$$\tilde{\mu} = \underline{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{v}^2 U_q^2}{2} + \tilde{v} U_q \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}^2 U_q^2}{4}} \right) = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}) \cdot K_2(q, \tilde{v}), \quad (35)$$

де  $K_2(q, \tilde{v})$  - поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу і довірчу вірогідність оцінки параметра.

5.3.2.5 Оцінку верхньої довірчої межі параметра масштабу  $\bar{\mu}$  обчислюють за формулою:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} K_2(q, \tilde{\nu}). \quad (36)$$

Значення поправкових коефіцієнтів  $K_1(\underline{P}, \bar{\nu})$   $K_2(q, \tilde{\nu})$  залежно від довірчої вірогідності і коефіцієнтів варіації приведені в таблицях Б.2 - Б.3.

5.3.2.6 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників залишкового ресурсу згідно 4.11.

#### **5.4 Прогнозування залишкового ресурсу за відсутності відмов експлуатованих, одиничних зразків при використанні $DN$ – розподілу**

5.4.1 Якщо в експлуатації (під спостереженням) знаходяться одиничні зразки ( $N \geq 4$ ), то за відсутності відмов впродовж інтервалу напрацювання  $t_u = \tau$ , оцінками залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) є:

- середнє значення очікуваного залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) :

$$\pi(\tau) = \frac{(\mu - \tau) \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}}\right) + (\mu + \tau) \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu \sqrt{\mu \tau}}\right)}. \quad (37)$$

- значення гамма-процентного залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) :

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu \cdot x(1 - \gamma^{**}; \nu) - \tau. \quad (38)$$

У виразах (37) і (38)  $\mu, \nu$  - оцінки параметрів первинного (розрахункового) розподілу напрацювання до відмови (граничного стану), отримані на етапі проектування (виробництва), а значення  $\gamma^{**}$  відповідно до 4.10.

5.4.2 Прогнозування залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) за відсутності відмов.

5.4.2.1 У разі, коли в експлуатації (під спостереженням) в течії напрацювання  $t_u = \tau$  знаходилася група ідентичних зразків ( $N \geq 4$ ) і не мала відмов, параметр форми визначають згідно Додатку А.

5.4.2.2 Визначають нижню межу вірогідності відсутності відмови  $\underline{P}(t_u)$  за інтервал експлуатації (спостереження)  $t_u$  з таблиці 1 або обчислюють за формулою (33).

5.4.2.3 Обчислюють нижню довірчу межу параметра масштабу  $\mu$   $DN$ -розподілу по формулі:

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x[1 - \underline{P}(t_u); \bar{\nu}]} = t_u \cdot K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu}), \quad (39)$$

де  $K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu})$  - поправковий коефіцієнт, що враховує емпіричну вірогідність відсутності відмови;

$x[1 - \underline{P}(t_u); \bar{\nu}]$  визначають згідно з рекомендаціями 4.10.

5.4.2.4 Використовуючи оцінку  $\underline{\mu}$ , що відповідає довірчій вірогідності  $q$ , отримують вибіркочну середню оцінку параметра  $\tilde{\mu}$ :

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x(1 - q; \tilde{\nu})} = t_u \cdot K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu}) \cdot K_2^*(q, \tilde{\nu}), \quad (40)$$

де  $K_2^*(q, \tilde{\nu})$  - поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу і довірчу вірогідність оцінки параметра.

5.4.2.5 Оцінку верхньої довірчої межі параметра масштабу  $\bar{\mu}$  обчислюють за формулою:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} x(q; \tilde{\nu}) = \tilde{\mu} \bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu}). \quad (41)$$

Значення поправкових коефіцієнтів  $K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu})$ ,  $K_2^*(q, \tilde{\nu})$  і  $\bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu})$  залежно від довірчої вірогідності і коефіцієнтів варіації приведені в таблицях Б.4 - Б.6 Додатка Б.

5.4.2.6 Визначивши значення параметрів  $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu}, \tilde{\mu}, \underline{\mu}, \bar{\mu})$ , обчислюють необхідні показники залишкового ресурсу згідно 4.12.

## 6 ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ВІДНОВЛЮВАНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ВІДМОВИ

**6.1 Визначення параметрів розподілу напрацювання на відмову за спостережуваний інтервал при використанні  $DM$  -розподілу**

6.1.1 Якщо процедура випробувань (спостережень) при експлуатації здійснюється по планах  $[NMT]$  чи  $[NM_r]$ , те обчислюють сумарне напрацювання усіх об'єктів по формулі  $S = \sum_{i=1}^N s_i$ , де  $s_i$  - загальне напрацювання  $i$ -го зразка за час випробувань (спостережень).

6.1.2 При малому числі відмов ( $r \leq 6$ ,  $d \leq 6$ ) значення параметра форми  $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$   $DM$  -розподілу напрацювання на відмову визначають згідно з Додатком А.

6.1.3 Обчислюють оцінку параметра масштабу  $DM$  -розподілу напрацювання на відмову:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m(1 + \tilde{\nu}^2 / 2)}. \quad (42)$$

6.1.4 Довірчі межі параметра масштабу для заданої довірчої вірогідності  $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$  обчислюють по формулах (23), (24), в яких  $m = r$  чи  $m = d$ .

6.1.5 Обчислюють середнє напрацювання на відмову (між відмовами) по формулі:

$$T_2 = \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{v}^2}{2} \right). \quad (43)$$

## 6.2 Визначення параметрів розподілу напрацювання на відмову за спостережуваний інтервал при використанні $DN$ -розподілу

6.2.1 Якщо процедура випробувань (спостережень) при експлуатації здійснюється по планах  $[NMT]$  чи  $[NM_r]$ , те обчислюють сумарне напрацювання усіх об'єктів по формулі  $S = \sum_{i=1}^N s_i$ , де  $s_i$  - загальне напрацювання  $i$ -го зразка за час випробувань (спостережень).

6.2.2 При малому числі відмов ( $r \leq 6$ ,  $d \leq 6$ ) значення параметра форми  $(\tilde{v}, \underline{v}, \bar{v})$   $DN$ -розподілу напрацювання на відмову визначають згідно з Додатком А.

6.2.3 Обчислюють оцінку параметра масштабу  $DN$  – розподіли напрацювання на відмову:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m}. \quad (44)$$

6.2.4 Довірчі межі параметра масштабу  $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$  обчислюють по формулах (28), (29), в яких  $m = r$  чи  $m = d$ .

6.2.5 Визначають середнє напрацювання на відмову (між відмовами) :

$$T_2 = \tilde{\mu}.$$



### 6.3 Оцінки параметрів $\mu^*$ і $\nu^*$ розподілу напрацювання між ушкодженнями певного типу (чи ушкодженням будь-якого типу)

Аналогічно попередньому пункту на підставі статистики появи ушкоджень обчислюють оцінки параметрів  $\mu^*$  і  $\nu^*$  розподіли напрацювання між ушкодженнями певного типу (чи ушкодженням будь-якого типу), а також середнє напрацювання між ушкодженнями  $T_2^*$ . Як теоретичну функцію розподілу ушкоджень аналогічно приймають  $DM$ -розподіл або  $DN$  – розподіл.

### 6.4 Обчислення залишкового терміну служби

6.4.1 Якщо як критерій граничного стану об'єкту прийнятий рівень середнього напрацювання на відмову (між відмовами)  $T_{дон}$ , то обчислюють залишковий термін служби таким чином.

6.4.1.1 Якщо встановлено середнє напрацювання до першої відмови  $T_1$ , то залишковий термін служби обчислюють за формулою:

$$T_{0_{сл}} = \frac{1}{8760 \cdot K_s} \left[ \frac{t_2}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} (\ln T_1 - \ln T_{дон}) \right] \text{ років,} \quad (45)$$

де  $K_s$  - коефіцієнт інтенсивності експлуатації (відношення часу включеного стану до календарного часу);

$T_1$  - середнє напрацювання до першої відмови об'єкту ;

$T_2$  - середнє напрацювання на відмову (між відмовами) на момент експлуатації (сумарного напрацювання)  $t_2$  ( $t_2$  може співпадати з  $\tau$ ).

$T_1$  визначають відповідно до розділу 6 або інших методів.  $T_2$  визначають згідно з 6.1-6.2.

6.4.1.2 Якщо невідоме значення  $T_1$ , то процедура обробки статистичних даних про відмови в процесі експлуатації передбачає ділення усього інтервалу спостережень на два приблизно рівні інтервали. При цьому, якщо встановлено значення середнього напрацювання на відмову (між відмовами)  $T_{02}$ , визначене на попередньому ранньому інтервалі спостережень, то залишковий термін служби обчислюють за формулою:

$$T_{0_{сл}} = \frac{1}{8760 \cdot K_3} \left[ \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_{02}}{T_2}\right)} (\ln T_{02} - \ln T_{дон}) + t_1 \right] \text{ років,} \quad (46)$$

де  $T_{02}$  - середнє напрацювання на відмову (між відмовами), вчислене на попередньому ранньому інтервалі спостережень  $t_1$  ( $t_1 \ll t_2$ )).

У останній формулі значення  $T_{02}$  і  $T_2$  обчислюють згідно з 6.1-6.2.

Примітка. Інтервали спостережень, як перший, так і другий, приймають досить тривалими, щоб спостерігалось не менше 6-10 відмов на кожному інтервалі.

6.4.2 Якщо як критерій граничного стану об'єкту прийнятий рівень середнього напрацювання між ушкодженнями (наприклад  $T_{дон}^* = T_{ППР}$ ), те обчислюють залишковий термін служби по аналогічних формулах:

Якщо встановлено значення середнього напрацювання до першого ушкодження  $T_1^*$ :

$$T_{0_{сл}}^* = \frac{1}{8760 \cdot K_3} \left[ \frac{t_2}{\ln\left(\frac{T_1^*}{T_2^*}\right)} (\ln T_1^* - \ln T_{дон}^*) \right] \text{ років,} \quad (47)$$

де  $T_1^*$  - середнє напрацювання до появи першого ушкодження об'єкту;

$T_2^*$  - середнє напрацювання між ушкодженнями на момент експлуатації (сумарного напрацювання)  $t_2^*$  ( $t_2^*$  може співпадати з  $\tau$ ).

Якщо значення  $T_1^*$  невідомо, але визначено значення середнього напрацювання між ушкодженнями  $T_{02}^*$  на попередньому, ранньому інтервалі  $t_1$  то залишковий термін служби обчислюють за формулою:

$$T_{0cl}^* = \frac{1}{8760 \cdot K_9} \left[ \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_{02}^*}{T_2^*}\right)} (\ln T_{02}^* - \ln T_{дон}^*) + t_1 \right] \text{ років,} \quad (48)$$

де  $T_{02}^*$  - середнє напрацювання між ушкодженнями, оцінене на попередньому ранньому інтервалі спостережень  $t_1$  ( $t_1 \ll t_2$ );

$T_1^*$  визначають відповідно до розділу 6 аналогічно оцінці  $T_1$ , а значення  $T_2^*$  і  $T_{02}^*$  визначають згідно 6.1-6.2.

**Примітка 1.** Формули (46) - (48) застосовують за природної умови для експлуатованого устаткування, коли  $T_2 (T_2^*) \leq T_{02} (T_{02}^*) \leq T_1 (T_1^*)$  при

**Примітка 2.** У разі, коли  $T_2 (T_2^*) \cong T_{02} (T_{02}^*)$  при оцінці залишкового терміну служби, передбачаючи деякий запас надійності, приймають  $T_2 (T_2^*) = 0,9 T_{02} (0,9 T_{02}^*)$ .

## 7 ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ НА ОСНОВІ ВИМІРУ РЕСУРСНИХ АБО ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 7.1 Оцінка і прогнозування залишкового ресурсу при вимірі ресурсного (визначального) параметра

7.1.1 У справжньому розділі пропонується процедура оцінки реального технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу виробів, коли відсутні відмови, але можуть бути виміряні в процесі експлуатації (випробувань) значення ресурсного (визначального) параметра, досягнення яким свого

граничного значення призводить до відмови (граничному стану), або значення деяких діагностичних параметрів, що побічно характеризують витрачання ресурсу цих виробів.

7.1.2 Є можливість для періодичного виміру ресурсного (визначального) параметра  $\varphi(t)$ .

Передбачається, що відомо або задається граничне значення визначального параметра  $\varphi(t)=\Pi$ . Проводять виміри визначального параметра через певний період часу експлуатації (випробувань)  $\Delta t$ . Період  $\Delta t$  приймають рівним значенню, таким, що забезпечує некорельовані прирости  $\Delta\varphi(\Delta t)$ . Інтервал кореляції приростів визначають заздалегідь або в процесі випробувань (експлуатації), прийнявши на початку інтервали виміру визначального параметра  $\Delta\tau \ll \Delta t$ . В результаті вимірів отримують ряд значень (неубутних) ресурсного параметра  $\varphi(t)$  для певних моментів напрацювання (що зростають) :  $\varphi(t_1)$ ;  $\varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t)$ ; ...;  $\varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t)$ .

Кількість приростів (вимірів)  $n$  повинно бути не менше десять (значення  $n \geq 10$ ).

7.1.3 За даними вимірів обчислюють середню швидкість зміни визначального параметра :

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \tilde{\Delta}\varphi / \Delta t . \quad (49)$$

Обчислюють коефіцієнт варіації приростів (швидкості зміни визначального параметра) :

$$v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - \tilde{\Delta}\varphi)^2} / \tilde{\Delta}\varphi . \quad (50)$$

7.1.4 Якщо визначальний параметр виробу змінюється монотонно (безповоротні зміни, тобто все  $\Delta\varphi_i$  мають знак плюс або деякі дорівнюють нулю), тоді закон розподілу залишкового ресурсу записують в наступному виді:

$$F(\tau) = DM(\tau; a, \nu) = \Phi\left(\frac{a\tau + \Pi_1 - \Pi}{\nu\sqrt{a\tau(\Pi - \Pi_1)}}\right), \quad (51)$$

де  $\tau$  - залишкове напрацювання (напрацювання після  $t_1$ );  $\Pi_1 = \varphi(t_{n+1})$ ; значення  $a$  і  $\nu$  обчислюють по формулах(49) і (50).

7.1.5 Обчислюють середній залишковий ресурс за формулою:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right). \quad (52)$$

7.1.6 Обчислюють гамма-процентний залишковий ресурс за формулою:

$$\tilde{\pi}_\gamma(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + \nu^2 U_\gamma^2 / 2 - \nu U_\gamma \sqrt{1 + \frac{\nu^2 U_\gamma^2}{4}}\right), \quad (53)$$

де  $U_\gamma$  - квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $\gamma$ .

## 7.2 Оцінка і прогнозування залишкового ресурсу при вимірі діагностичних параметрів

7.2.1 Трапляється нагода виміру деяких діагностичних параметрів, які побічно характеризують технічний стан і витрачання ресурсу виробу. В цьому випадку процедура оцінки реального технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу зводиться до наступного.

7.2.1.1 За результатами попередніх випробувань (експлуатації) встановлюють зв'язок між граничними значеннями визначального (ресурсного) параметра і діагностичних параметрів. При цьому з метою нормування граничних значень можуть бути проведені прискорені випробування. Передбачається, що граничний стан при прискорених

випробуваннях (у форсованих режимах) відповідає граничному стану виробу в умовах експлуатації.

7.2.1.2 Отримують результати одночасних вимірів ресурсного (визначального)  $\varphi(t_i) = x_k(t_i)$  (індекс  $i$  відповідає моменту часу напрацювання і виміру параметрів) і діагностичних параметрів  $x_j(t_i)$  (індекс  $j$  відповідає номеру контрольованих параметрів;  $j = 1, 2, \dots, k$ ). При цьому ресурсному параметру привласнюють номер  $k$  і вважають відомим його граничне значення ( $\Pi = x_{k \lim} \geq x_k(t_n)$ ).

7.2.1.3 Після апроксимації змінних  $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_k(t_i)$  по методу найменших квадратів будується діагностична модель зміни ресурсного і діагностичних параметрів в наступному виді:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1k}x_k, \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2k}x_k, \\ &\dots\dots\dots, \\ \frac{dx_k}{dt} &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nk}x_k, \end{aligned} \tag{54}$$

де  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k$ ) - постійні коефіцієнти. Невідомі коефіцієнти  $a_{ij}$  знаходяться з мінімізації відповідних квадратичних форм.

Інтегруючи систему звичайних диференціальних рівнянь (54), набувають граничних значень  $x_{1 \lim}, x_{2 \lim}, \dots, x_{(k-1) \lim}$  для діагностичних параметрів за умови, що ресурсний параметр досягає свого заданого граничного значення  $x_{k \lim} = \Pi$ .

Модель зміни ресурсного і діагностичних параметрів при апроксимації змінних будується з використанням лінійної, квадратичної або експоненціальної залежностей. Приймається як рішення найбільш адекватна модель, що мінімізує суму квадратів відхилень вчислених по формулах

апроксимацій значень кожної змінної  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  у моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . Вибрана, найбільш адекватна модель для кожної змінної використовується також при побудові систем лінійних рівнянь алгебри для обчислення коефіцієнтів  $a_{ij}$  системи диференціальних рівнянь (54). Для чисельної інтеграції системи рівнянь (54) використовують метод Рунге-Кутта 4-го порядку точності. Чисельну інтеграцію закінчують при досягненні ресурсним (визначальним) параметром свого заданого граничного значення.

7.2.1.4 Використовуючи результати попередніх досліджень, а також будь-які інші статистичні дані, що стосуються цих параметрів, обчислюють коефіцієнти варіації ресурсного і діагностичних параметрів за формулою:

$$v_j = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ji}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \Delta x_{ji} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{ji} \right)^2}, \quad (55)$$

де  $\Delta x_{ji} = x_{j,i+1} - x_{ji}$  індекс  $j$  відповідає номеру контрольованого параметра ( $j = 1, 2, \dots, k$ ), а індекс  $i$  відповідає моменту часу (напрацювання)  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

7.2.1.5 Після того, як встановлені граничні значення діагностичних параметрів  $(x_{1\text{lim}}, x_{2\text{lim}}, \dots, x_{k\text{lim}})$  представляється можливим по виміру тільки діагностичних параметрів  $(x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$  визначити залишковий ресурс.

На основі результатів вимірів тільки діагностичних параметрів будується система динамічних рівнянь, аналогічна (54) :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + \dots + b_{1(k-1)}x_{k-1}; \\ \frac{dx_2}{dt} &= b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + \dots + b_{2(k-1)}x_{k-1}; \\ &\dots\dots\dots; \\ \frac{dx_n}{dt} &= b_{n1}x_1 + b_{n2}x_2 + \dots + b_{n(k-1)}x_{k-1}. \end{aligned} \quad (56)$$

Інтегруючи систему (56), обчислюють прогнозований залишковий ресурс, визначуваний напрацюванням, за яке хоч би один з діагностичних параметрів досягає свого граничного значення. В результаті інтеграції системи (56) набувають значень напрацювань  $t_{x1 \text{ lim}}, t_{x2 \text{ lim}}, \dots, t_{x_{k-1} \text{ lim}}$  за які діагностичні параметри досягають свої граничні значення.

7.2.1.6 Обчислюють мінімальне значення, яке приймається як оцінка середнього значення залишкового ресурсу :

$$\tilde{\pi}(\tau) = \min \{ (t_{x1 \text{ lim}} - t_{\text{изм}}); (t_{x2 \text{ lim}} - t_{\text{изм}}) \}, \quad (57)$$

де  $t_{\text{изм}}$  - напрацювання, що відповідає останньому виміру діагностичних параметрів.

7.2.2 З метою визначення закону розподілу залишкового ресурсу, а також інших показників, якщо в процесі вимірів встановлено, що зміна ресурсного (визначального) параметра має монотонний характер, приймають як теоретичну модель розподілу залишкового ресурсу (залишкового напрацювання до відмови) DM- розподіл виду :

$$F(\tau) = DM(\tau; \mu_o, \nu) = \Phi \left( \frac{\tau - \mu_o}{\nu \sqrt{\mu_o \tau}} \right). \quad (58)$$

Оцінкою параметра форми  $\nu$  розподіли (58) являється оцінка коефіцієнта варіації приростів ресурсного (визначального) параметра, вчислена по формулі (50) або (55). Оцінкою параметра масштабу  $\mu_o$  розподілу (58) являється:

$$\tilde{\mu}_o = \tilde{\pi}(\tau) / (1 + \tilde{\nu}^2 / 2),$$

де значення  $\tilde{\pi}(\tau)$  обчислюють за формулою (57).



7.2.3 Гамма-процентний залишковий ресурс обчислюють, використовуючи оцінки параметрів розподілу залишкового ресурсу, по формулі:

$$\tilde{\pi}_\gamma(\tau) = \tilde{\mu}_o \left( 1 + \frac{\tilde{v}^2 U_\gamma^2}{2} - \tilde{v} U_\gamma \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}^2 U_\gamma^2}{4}} \right). \quad (59)$$

7.2.4 Вірогідність безвідмовної роботи за напрацювання  $\tau_{зад}$  після моменту  $t_{изм}$  обчислюють за формулою:

$$P(\tau_{зад}) = \Phi \left( \frac{\tilde{\mu}_o - \tau_{зад}}{\tilde{v} \sqrt{\tilde{\mu}_o \tau_{зад}}} \right) \quad (60)$$

## 8 ВСТАНОВЛЕННЯ РЕГЛАМЕНТОВАНОГО ТЕРМІНУ ПОДАЛЬШОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Якщо на певний момент експлуатації  $\tau$  (сумарного напрацювання) визначені характеристики розподілу залишкового ресурсу і (чи) терміну служби з довірчою вірогідністю  $q$  то, задаючись відповідним значенням рівня достовірності (гарантії)  $\gamma_p$ , обчислюють регламентований термін подальшої експлуатації. Значення довірчої вірогідності  $\gamma_p$  приймають з міркувань, в першу чергу, безпеці і економічній доцільності з ряду: 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 0,99. При цьому  $\gamma_p$  повинно бути менш  $q$  ( $\gamma_p < q$ ).

### 8.1 Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для невідновних об'єктів при використанні *DM*-розподілу

8.1.1 На підставі попередніх розділів справжнього стандарту на момент контролю  $\tau$  визначають параметри  $\mu_0$  і  $\nu_0$  розподіли залишкового напрацювання  $t_{0сл}$  до граничного стану (ресурсу):

$$F(t_{0cl}) = DM(t_{0cl}; \mu_0, \nu_0) = \Phi \left( \frac{t_{0cl} - \mu_0}{\nu_0 \sqrt{\mu_0 t_{0cl}}} \right), \quad (61)$$

де  $t_{0cl}$  - час експлуатації після моменту контролю  $\tau$ ;

$$\mu_0 = \tilde{\pi}(\tau) / (1 + \nu_0^2 / 2); \quad \nu_0 = \tilde{\nu}.$$

8.1.2 Обчислюють значення регламентованого терміну подальшої експлуатації за формулою:

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \frac{1}{8760 \cdot K_s} \left[ \mu_0 \left( 1 + \frac{\nu_0^2 U^2}{2 \gamma_p^q} - \nu_0 U \sqrt{1 + \frac{\nu_0^2 U^2}{4 \gamma_p^q}} \right) \right] \text{ років}, \quad (62)$$

$$\text{де } \gamma_p^q = \gamma_p / q; \quad q = q_1 \cdot q_2 = 0,9 \cdot \Phi \left( \frac{\xi \sqrt{2m}}{\nu_0 \sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi^2}}} \right); \quad q_1 - \text{ довірча}$$

вірогідність оцінки коефіцієнта варіації (якщо коефіцієнт варіації визначався з приведених таблиць Додатка Б, то приймають  $q_1 = 0,9$ );  $q_2$  - довірча вірогідність оцінки параметра масштабу  $\mu_0$ ;  $m$  - об'єм статистики відмов, використаної для оцінки параметра масштабу;  $\xi$  - відносна погрішність оцінки параметра масштабу (приймають з ряду: 0,1; 0,2; 0,3).

Значення довірчої вірогідності оцінки параметра масштабу ( $q_2$ ) залежно від статистики відмов ( $m$ ), відносної помилки ( $\xi$ ) і коефіцієнта варіації напрацювання ( $\nu$ ), вчислені по наведеній вище формулі, приведені в таблиці Б.8.

## 8.2 Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для відновлюваних об'єктів

8.2.1 На підставі попередніх розділів справжнього стандарту визначають середній залишковий термін служби  $T_{0cl}$  з довірчою вірогідністю  $q$ .

8.2.2 Приймають як закон розподілу залишкового терміну служби  $DM$ -розподілу:

$$F(t_{0cl}) = DM(t_{0cl}; \mu_{cl}, v_{cl}) = \Phi\left(\frac{t_{0cl} - \mu_{cl}}{v_{cl} \sqrt{\mu_{cl} t_{0cl}}}\right), \quad (63)$$

де  $\mu_{cl} = T_{0cl} / (1 + v_{cl}^2 / 2)$ ;  $v_{cl} = \tilde{v} / \sqrt{T_{0cl} / T_2}$ .

8.2.3 Обчислюють значення регламентованого терміну подальшої експлуатації за формулою:

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \frac{\mu_{cl}}{8760 \cdot K_3} \left( 1 + \frac{v_{cl}^2 U_{\gamma_p^q}^2}{2} - v_{cl} U_{\gamma_p^q} \sqrt{1 + \frac{v_{cl}^2 U_{\gamma_p^q}^2}{4}} \right) \text{ років}, \quad (64)$$

де  $U_{\gamma_p^q}$  - квантиль нормованого нормального розподілу рівня  $\gamma_p^q$ ; значення  $\gamma_p^q$  визначають згідно 8.1.

### 8.3 Визначення регламентного терміну подальшої експлуатації при використанні $DN$ -розподілу

8.3.1 Якщо на певний момент експлуатації  $\tau$  (сумарного напрацювання) визначені характеристики розподілу залишкового ресурсу і (чи) терміну служби з деякою довірчою вірогідністю  $q$ , то, задаючись, відповідним значенням рівня достовірності (гарантії)  $\gamma_p$ , обчислюють регламентований термін подальшої експлуатації. Значення довірчої вірогідності  $\gamma_p$  приймають згідно з рекомендаціями 8.1.

8.3.2 Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для невідновних об'єктів при використанні  $DN$ -розподілу.

8.3.2.1 На підставі попередніх пунктів справжнього нормативного матеріалу на момент контролю  $\tau$  визначають параметри  $\mu_0$  і  $v_0$  розподіли залишкового напрацювання  $t_{0cl}$  до граничного стану (ресурсу):

$$F(t_{0сл}) = DN(t_{0сл}; \mu_0, \nu_0) = \Phi\left(\frac{t_{0сл} - \mu_0}{\nu_0 \sqrt{\mu_0 t_{0сл}}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu_0^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{t_{0сл} + \mu_0}{\nu_0 \sqrt{\mu_0 t_{0сл}}}\right), \quad (65)$$

де  $\mu_0 = \tilde{\pi}(\tau)$ ;  $\tilde{\pi}(\tau)$  обчислюють за формулою (37);  $\nu_0 = \tilde{\nu}$  ( $\tilde{\nu}$  визначають згідно з Додатком А).

8.3.2.2 Обчислюють значення регламентованого терміну подальшої експлуатації за формулою:

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \frac{1}{8760 \cdot K_s} [\mu_0 \cdot x(1 - \gamma_p^q; \nu_0)] \text{ років}, \quad (66)$$

де  $\gamma_p^q = \gamma_p / q$  обчислюють згідно з 8.2.2.

8.3.3 Визначення регламентованого терміну подальшої експлуатації для відновлюваних об'єктів при використанні  $DN$ -розподілу.

8.3.3.1 На підставі попереднього пункту визначають середній залишковий термін служби  $T_{0сл}$ .

8.3.3.2 Приймають як закон розподілу залишкового терміну служби  $DN$ -розподілу:

$$F(t_{0сл}) = DN(t_{0сл}; \mu_{сл}, \nu_{сл}) = \Phi\left(\frac{t_{0сл} - \mu_{сл}}{\nu_{сл} \sqrt{\mu_{сл} t_{0сл}}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu_{сл}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_{сл} + t_{0сл}}{\nu_{сл} \sqrt{\mu_{сл} t_{0сл}}}\right), \quad (67)$$

де  $t_{0сл}$  - час експлуатації після моменту контролю  $\tau$ ;

$$\mu_{сл} = T_{0сл}; \quad \nu_{сл} = \tilde{\nu} / \sqrt{T_{0сл} / T_2}.$$

8.3.3.3 Обчислюють значення регламентованого терміну подальшої експлуатації за формулою:

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \frac{\mu_{сл} \cdot x(1 - \gamma_p^q; \nu_{сл})}{8760 \cdot K_s} \text{ років}. \quad (68)$$

ДОДАТОК А  
(довідковий)

РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВИЗНАЧЕННЮ КОЕФІЦІЄНТА ВАРІАЦІЇ

На підставі результатів випробувань і експлуатації аналогів тепломеханічного устаткування встановлено, що коефіцієнти варіації напрацювання до відмови (ресурсу) об'єктів мають значення 0,3...0,9. Якщо немає конкретних уточнювальних даних, набувають значень коефіцієнтів варіації, виходячи з рекомендацій цього Додатка або ДСТУ 3433.

Якщо встановлені переважаючі процеси руйнування і їх доля (відсотки) у формуванні відмов, то очікуване середнє значення коефіцієнта варіації визначають по формулі:

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}, \quad (\text{A.1})$$

де  $v_i, p_i$  - відповідно середнє значення коефіцієнта варіації і пайовий вклад  $i$ -го процесу руйнування (об'ємна втома, контактна втома, механічний знос та ін.  $i = 1, 2, \dots, k$ ). При цьому  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$ .

Досвід експлуатації і аналіз відмов електротехнічного устаткування дозволяє встановити, що коефіцієнт варіації цих виробів має значення 0,5...1,0.

Значення коефіцієнтів варіації напрацювання до відмови (ресурсу) для типових об'єктів тепломеханічного і електротехнічного устаткування приведені нижче в таблицях А.1-А.2.

Для об'єктів, не включених в таблиці А.1-А.2, апіорі визначають коефіцієнт варіації напрацювання на підставі аналізу процесів деградації, що призводять до відмов, використовуючи рекомендації А.2 і значення

коефіцієнтів варіації основних типових процесів деградації, приведені нижче в таблиці А.3.

Враховуючи об'єм і число розглянутих даних (вибірок), на підставі яких визначені діапазони коефіцієнтів варіації (десятки вибірок), можна стверджувати, що довірча вірогідність вказаних інтервалів істотно вище 0,9.

Таблиця А.1 – значення коефіцієнтів варіації напрацювань і видів процесів руйнувань для типових об'єктів тепломеханічного устаткування

| Найменування об'єктів     | Основні види руйнування (відмов)  | Коефіцієнт варіації |
|---------------------------|---|---------------------|
| Арматура                  | Знос і старіння матеріалів ущільнювачів, статичне руйнування, втома металів   | 0,30 - 0,65         |
| Насосні агрегати          | Знос і контактна втома підшипників, знос і старіння матеріалів (манжет, гумових кілець) ущільнювачів, статичне руйнування | 0,30 - 0,90         |
| Посудини і теплообмінники | Тріщини (втома), знос і старіння прокладень, корозія  | 0,30 - 0,70         |
| Трубопроводи              | Старіння, об'ємна втома зварних швів і основного металу   | 0,40 - 0,70         |
| Вентагрегати              | Знос, контактна втома, старіння матеріалів  | 0,35 - 0,75         |

Таблиця А.2 – значення коефіцієнтів варіації напрацювань і видів процесів руйнувань для типових об'єктів електротехнічного устаткування

| Найменування об'єктів        | Основні види руйнування (відмов)  | Коефіцієнт варіації |
|------------------------------|---|---------------------|
| Електродвигуни               | Знос і контактна втома підшипників, електричні процеси, втома внаслідок циклічного нагріву і вібрацій | 0,50 - 1,0          |
| Устаткування пожежогасінні   | Знос і старіння матеріалів ущільнювачів, об'ємна втома, статичне руйнування                           | 0,40 - 0,80         |
| Кабелі                       | Старіння ізоляції, втома матеріалів внаслідок циклічного перегрівання                                 | 0,60 - 1,0          |
| Силові трансформатори        | Старіння, знос, втома   | 0,40 - 0,70         |
| Повітряні компресори         | Знос, втома, старіння матеріалів  | 0,35 - 0,75         |
| Електроприводи арматури      | Знос і контактна втома підшипників, електричні процеси, втома внаслідок циклічного нагріву і вібрацій | 0,50 - 1,0          |
| Засоби контролю і управління | Знос, механічні руйнування, втома матеріалів внаслідок циклічного перегрівання, електричні процеси    | 0,50 - 1,0          |

Таблиця А.3 - значення коефіцієнтів варіації основних процесів деградації (руйнування)

| Вид руйнування<br>(процес деградації)                                   | Коефіцієнт варіації процесу<br>Руйнування |
|---|---|
| Втома:  | 0,15 – 0,40                               |
| малоциклова   | 0,40 – 1,00                               |
| багатоциклова   | 0,40 – 1,20                               |
| контактна   |   |
| Знос  |   |
| механо-хімічний   | 0,20 – 0,50                               |
| абразивний  | 0,40 – 0,70                               |
| Старіння  | 0,40 – 1,00                               |
| Електричні процеси<br>(електроліз, міграція зарядів,<br>електродифузія) | 0,70 – 1,50                               |

Набуття чисельного значення коефіцієнта варіації з вказаних діапазонів вище приведених таблиць у кожному конкретному випадку диктується міркуваннями загального характеру : збільшення відношення навантаження до межі витривалості (міцності) відносно середнього статистичного призводить до зменшення коефіцієнта варіації і навпаки, тобто чим менше коефіцієнта навантаження, тим більше коефіцієнта варіації.

ДОДАТОК Б  
(обов'язковий)

ТАБЛИЦІ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

Таблиця Б.1 – значення квантилів нормованого нормального розподілу

| Вірогідність $p$ | Квантиль $U_p$ | Вірогідність $p$ | Квантиль $U_p$ |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 0.0000001        | - 5,125        | 0.5              | 0              |
| 0.000001         | - 4.767        | 0.6              | 0,253          |
| 0.00001          | - 4.267        | 0.7              | 0,524          |
| 0.00005          | - 3,899        | 0.8              | 0,842          |
| 0.0001           | - 3,719        | 0.9              | 1,282          |
| 0.001            | - 3,090        | 0.95             | 1,645          |
| 0.005            | - 2,576        | 0.975            | 1,960          |
| 0.01             | - 2,326        | 0.990            | 2,326          |
| 0.025            | - 1,960        | 0.995            | 2,576          |
| 0.05             | - 1,645        | 0.999            | 3,090          |
| 0.1              | - 1,282        | 0.9999           | 3,719          |
| 0.2              | - 0,842        | 0.99999          | 4.267          |
| 0.3              | - 0,524        | 0.999999         | 4.767          |
| 0.4              | - 0,253        | 0.9999999        | 5.125          |

Таблиця Б.2 – значення поправкового коефіцієнта  $K_1(P, \bar{\nu})$

| $P$  | Значення $K_1(P, \bar{\nu})$ при $\bar{\nu}$ |       |       |       |       |
|------|--|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,3  | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   |
| 0,30 | 0,850  | 0,810 | 0,770 | 0,731 | 0,694 |
| 0,40 | 0,927  | 0,904 | 0,881 | 0,849 | 0,838 |
| 0,50 | 1  | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 0,60 | 1,079  | 1,106 | 1,135 | 1,164 | 1,194 |
| 0,70 | 1,170  | 1,233 | 1,298 | 1,368 | 1,440 |
| 0,80 | 1,286  | 1,398 | 1,519 | 1,648 | 1,788 |
| 0,90 | 1,466  | 1,661 | 1,878 | 2,120 | 2,386 |
| 0,95 | 1,630  | 1,909 | 2,228 | 2,588 | 2,992 |
| 0,96 | 1,681  | 1,987 | 2,338 | 2,737 | 3,187 |
| 0,97 | 1,746  | 2,087 | 2,482 | 2,933 | 3,443 |
| 0,98 | 1,835  | 2,226 | 2,681 | 3,207 | 3,804 |



Кінець таблиці Б.2

| $\underline{P}$ | Значення $K_1(\underline{P}, \bar{\nu})$ при $\bar{\nu}$ |       |       |       |       |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0,3  | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   |
| 0,99            | 1,982  | 2,459 | 3,022 | 3,676 | 4,425 |
| 0,995           | 2,127  | 2,689 | 3,361 | 4,148 | 5,054 |
| 0,999           | 2,451  | 3,217 | 4,146 | 5,248 | 6,525 |
| 0,9995          | 2,588  | 3,442 | 4,487 | 5,724 | 7,165 |

Таблиця Б.3 - значення поправкового коефіцієнта  $K_2(q, \tilde{\nu})$ 

| $q$  | Значення $K_2(q, \tilde{\nu})$ при $\tilde{\nu}$ |       |       |       |       |
|------|--|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,3  | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   |
| 0,9  | 1,466  | 1,661 | 1,878 | 2,120 | 2,386 |
| 0,95 | 1,630  | 1,909 | 2,228 | 2,588 | 2,992 |

Таблиця Б.4 – значення поправкового коефіцієнта  $K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu})$ 

| $\underline{P}$ | Значення $K_1^*(\underline{P}, \bar{\nu})$ при $\bar{\nu}$ |       |       |       |       |       |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0,5  | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   |
| 0,30            | 0,869  | 0,870 | 0,875 | 0,886 | 0,902 | 0,962 |
| 0,40            | 0,994  | 1,016 | 1,047 | 1,084 | 1,129 | 1,178 |
| 0,50            | 1,124  | 1,176 | 1,239 | 1,311 | 1,391 | 1,479 |
| 0,60            | 1,271  | 1,359 | 1,462 | 1,577 | 1,706 | 1,848 |
| 0,70            | 1,445  | 1,582 | 1,742 | 1,916 | 2,114 | 2,326 |
| 0,80            | 1,678  | 1,887 | 2,128 | 2,381 | 2,681 | 3,003 |
| 0,90            | 2,045  | 2,398 | 2,740 | 3,155 | 3,623 | 4,202 |
| 0,95            | 2,415  | 2,890 | 3,413 | 4,000 | 4,695 | 5,435 |
| 0,96            | 2,538  | 3,049 | 3,623 | 4,274 | 4,950 | 5,814 |
| 0,97            | 2,681  | 3,257 | 3,891 | 4,630 | 5,435 | 6,369 |
| 0,98            | 2,890  | 3,534 | 4,273 | 5,102 | 6,061 | 7,092 |
| 0,99            | 3,257  | 4,000 | 4,950 | 5,917 | 6,849 | 8,333 |
| 0,995           | 3,676  | 4,484 | 5,555 | 6,803 | 8,130 | 9,709 |
| 0,999           | 4,367  | 5,618 | 7,092 | 8,696 | 10,64 | 12,63 |
| 0,9995          | 4,739  | 6,135 | 7,692 | 9,615 | 11,63 | 13,93 |

Таблиця Б.5 – значення поправкового коефіцієнта  $K_2^*(q, \tilde{\nu})$ 

| $q$  | Значення $K_2^*(q, \tilde{\nu})$ для $\tilde{\nu}$ |       |       |       |       |       |
|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,5  | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   |
| 0,9  | 2,058  | 2,392 | 2,770 | 3,205 | 3,584 | 4,202 |
| 0,95 | 2,427  | 2,882 | 3,413 | 4,032 | 4,695 | 5,435 |

Таблиця Б.6 – значення поправкового коефіцієнта  $\bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu})$ 

| $q$  | Значення $\bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu})$ для $\tilde{\nu}$ |       |       |       |       |       |
|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,5  | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   |
| 0,9  | 1,655  | 1,771 | 1,873 | 1,978 | 2,066 | 2,143 |
| 0,95 | 1,961  | 2,164 | 2,364 | 2,557 | 2,744 | 2,922 |

Таблиця Б.7 – значення  $x(F, \nu)$ 

| F      | Значення $x(F, \nu)$ для $\nu$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 0.1                            | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    | 1.0    |
| 0.0001 | 0.7054                         | 0.5035 | 0.3510 | 0.2551 | 0.1803 | 0.1380 | 0.1082 | 0.0868 | 0.0709 | 0.0589 |
| 0.0005 | 0.7207                         | 0.5237 | 0.3753 | 0.2784 | 0.2112 | 0.1638 | 0.1298 | 0.1048 | 0.0861 | 0.0718 |
| 0.0010 | 0.7351                         | 0.5441 | 0.3958 | 0.2973 | 0.2277 | 0.1779 | 0.1417 | 0.1149 | 0.0947 | 0.0792 |
| 0.0050 | 0.7735                         | 0.6007 | 0.4551 | 0.3537 | 0.2784 | 0.2223 | 0.1801 | 0.1480 | 0.1233 | 0.1039 |
| 0.0100 | 0.7929                         | 0.6305 | 0.4876 | 0.3859 | 0.3083 | 0.2491 | 0.2038 | 0.1688 | 0.1414 | 0.1198 |
| 0.0500 | 0.8485                         | 0.7207 | 0.5913 | 0.4934 | 0.4127 | 0.3466 | 0.2928 | 0.2491 | 0.2134 | 0.1841 |
| 0.1000 | 0.8798                         | 0.7744 | 0.6566 | 0.5650 | 0.4857 | 0.4180 | 0.3607 | 0.3124 | 0.2718 | 0.2376 |
| 0.2000 | 0.9193                         | 0.8452 | 0.7465 | 0.6680 | 0.5954 | 0.5294 | 0.4704 | 0.4182 | 0.3722 | 0.3320 |
| 0.3000 | 0.9489                         | 0.9005 | 0.8196 | 0.7551 | 0.6918 | 0.6312 | 0.5743 | 0.5216 | 0.4734 | 0.4297 |
| 0.4000 | 0.9750                         | 0.9506 | 0.8880 | 0.8392 | 0.7879 | 0.7356 | 0.6839 | 0.6338 | 0.5861 | 0.5411 |
| 0.5000 | 1.0000                         | 1.0000 | 0.9572 | 0.9267 | 0.8905 | 0.8502 | 0.8074 | 0.7634 | 0.7193 | 0.6758 |
| 0.6000 | 1.0257                         | 1.0520 | 1.0320 | 1.0236 | 1.0070 | 0.9837 | 0.9548 | 0.9219 | 0.8860 | 0.8483 |
| 0.7000 | 1.0538                         | 1.1105 | 1.1184 | 1.1384 | 1.1488 | 1.1501 | 1.1433 | 1.1294 | 1.1097 | 1.0851 |
| 0.8000 | 1.0878                         | 1.1831 | 1.2284 | 1.2888 | 1.3395 | 1.3800 | 1.4106 | 1.4316 | 1.4438 | 1.4479 |
| 0.9000 | 1.1366                         | 1.2913 | 1.3983 | 1.5287 | 1.6533 | 1.7705 | 1.8787 | 1.9771 | 2.0653 | 2.1430 |
| 0.9500 | 1.1786                         | 1.3875 | 1.5546 | 1.7565 | 1.9606 | 2.1638 | 2.3634 | 2.5574 | 2.7440 | 2.9221 |
| 0.9900 | 1.2613                         | 1.5859 | 1.8905 | 2.2641 | 2.6682 | 3.0978 | 3.5482 | 4.0152 | 4.4950 | 4.9841 |
| 0.9950 | 1.2929                         | 1.6647 | 2.0282 | 2.4779 | 2.9735 | 3.5093 | 4.0802 | 4.6812 | 5.3079 | 5.9563 |
| 0.9990 | 1.3604                         | 1.8379 | 2.3386 | 2.9695 | 3.6866 | 4.4839 | 5.3551 | 6.2943 | 7.2959 | 8.3549 |
| 0.9995 | 1.3876                         | 1.9094 | 2.4694 | 3.1800 | 3.9959 | 4.9108 | 5.9184 | 7.0124 | 8.1867 | 9.4362 |

Таблиця Б.8 - Значення довірчої вірогідності оцінки параметра масштабу ( $q_2$ ) залежно від статистики відмов ( $m$ ), відносної помилки ( $\xi$ ) і коефіцієнта варіації напрацювання ( $\nu$ )

| $\xi$ | $\nu$ | $m$   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 15    |
| 0,2   | 0,4   | 0,760 | 0,806 | 0,840 | 0,867 | 0,884 | 0,906 | 0,919 | 0,931 | 0,942 | 0,973 |
|       | 0,5   | 0,714 | 0,755 | 0,787 | 0,813 | 0,834 | 0,853 | 0,870 | 0,884 | 0,896 | 0,938 |
|       | 0,6   | 0,680 | 0,716 | 0,747 | 0,771 | 0,791 | 0,810 | 0,825 | 0,838 | 0,851 | 0,900 |
|       | 0,7   | 0,656 | 0,688 | 0,715 | 0,737 | 0,756 | 0,773 | 0,788 | 0,803 | 0,815 | 0,864 |
|       | 0,8   | 0,638 | 0,667 | 0,690 | 0,710 | 0,729 | 0,745 | 0,758 | 0,772 | 0,784 | 0,831 |
|       | 0,9   | 0,623 | 0,649 | 0,671 | 0,689 | 0,705 | 0,720 | 0,734 | 0,747 | 0,758 | 0,804 |
|       | 1,0   | 0,611 | 0,635 | 0,653 | 0,672 | 0,686 | 0,700 | 0,713 | 0,725 | 0,735 | 0,779 |
| 0,3   | 0,4   | 0,852 | 0,900 | 0,930 | 0,951 | 0,964 | 0,975 | 0,982 | 0,987 | 0,990 | 0,998 |
|       | 0,5   | 0,799 | 0,848 | 0,875 | 0,908 | 0,927 | 0,942 | 0,953 | 0,962 | 0,969 | 0,989 |
|       | 0,6   | 0,758 | 0,805 | 0,838 | 0,866 | 0,887 | 0,904 | 0,919 | 0,931 | 0,941 | 0,972 |
|       | 0,7   | 0,725 | 0,768 | 0,802 | 0,828 | 0,850 | 0,868 | 0,885 | 0,899 | 0,910 | 0,950 |
|       | 0,8   | 0,700 | 0,739 | 0,771 | 0,796 | 0,818 | 0,836 | 0,852 | 0,868 | 0,877 | 0,925 |
|       | 0,9   | 0,680 | 0,716 | 0,746 | 0,769 | 0,790 | 0,810 | 0,824 | 0,839 | 0,851 | 0,899 |
|       | 1,0   | 0,662 | 0,696 | 0,724 | 0,746 | 0,768 | 0,783 | 0,799 | 0,813 | 0,826 | 0,875 |

## ДОДАТОК В (довідковий)

### ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ НОРМАТИВНОГО МАТЕРІАЛУ

#### Приклад 1

Група арматури (зворотні клапани) у складі 15 зразків знаходиться в експлуатації в течії 16 років. По двох виробках зафіксовані відмови і зроблені заміни. При цьому напрацювання виробів, що відмовили, склали 37000 година і 45000 година відповідно. Після заміни ці два зразки напрацювали до моменту контролю (цензурування) відповідно до 93000 годину і 85000

година. Напрацювання іншої арматури (13 зразків) до моменту контролю склало  $\tau = 130000$  година. Вимагається визначити середній залишковий ресурс  $\pi(\tau)$  гамма-процентний залишковий ресурс  $\pi_\gamma(\tau)$  (для  $\gamma = 0,95$ ) і регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$ .

### Рішення

Досліджуються механічні об'єкти, оцінка показників надійності робиться згідно з розділом 6 справжньої методики.

1) У зв'язку з крихтою статистики відмов оцінка коефіцієнта варіації напрацювання до відмови (ресурсу) досліджуваної арматури визначається згідно з рекомендаціями Додатка А до справжньої методики. Аналіз механізмів відмов виробів і їх аналогів показав, що головними причинами відмов є контактна втома і знос відповідальних механічних елементів. У зв'язку з цим приймають рішення, враховуючи рекомендації справжньої методики, що очікуване значення коефіцієнта варіації ресурсу рівне  $\tilde{\nu} = 0,5$ .

2) За результатами приведених даних згідно з рекомендаціями методики формують варіаційний ряд напрацювань до відмови  $(t_1, t_2)$  і до цензурування  $(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$ :

$$(t_1, t_2, \tau_1, \tau_2, \tau_3) = (37000, 45000, 85000, 93000, 130000).$$

3) Обчислюють значення емпіричної функції розподілу за формулою (25) і визначають значення квантилів  $U_{F_j}$  нормованого нормального розподілу для відповідної вірогідності  $F_j$  використовуючи таблицю Б.1:

|               |         |         |         |         |         |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $t_j(\tau_j)$ | 37000   | 45000   | 85000   | 93000   | 130000  |
| $F_j$         | 0,05882 | 0,1142  | 0,1142  | 0,1142  | 0,1142  |
| $U_{F_j}$     | - 1,565 | - 1,205 | - 1,205 | - 1,205 | - 1,205 |

4) Використовуючи формулу (26) обчислюють оцінку параметра масштабу  $\mu$  при цьому  $w = 5$ ;  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$ ;  $k_5 = 13$ ; значення напрацьовань  $t_j(\tau_j)$  і  $U_{F_j}$  з попередньої таблиці:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu} &= \frac{1}{\sum_{j=1}^w k_j} \left[ \sum_{j=1}^w k_j t_j \left( 1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 2 - \tilde{\nu} U_{F_j} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{F_j}^2 / 4} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{\sum_{j=1}^5 k_j} \left[ 37000 \left( 1 + \frac{0,5^2 (-1,565)^2}{2} - 0,5 \cdot (-1,565) \sqrt{1 + \frac{0,5^2 (-1,565)^2}{4}} \right) + \right. \\ &+ 45000 \left( 1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{2} - 0,5 \cdot (-1,205) \sqrt{1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{4}} \right) + \\ &+ 85000 \left( 1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{2} - 0,5 \cdot (-1,205) \sqrt{1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{4}} \right) + \\ &+ 93000 \left( 1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{2} - 0,5 \cdot (-1,205) \sqrt{1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{4}} \right) + \\ &\left. + 13 \cdot 130000 \left( 1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{2} - 0,5 \cdot (-1,205) \sqrt{1 + \frac{0,5^2 (-1,205)^2}{4}} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{17} (79417 + 81484 + 153914 + 168400 + 13 \cdot 235397) = 208434. \end{aligned}$$

5) Обчислюють середній залишковий ресурс досліджуваних виробів, використовуючи формулу (9) :

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{\left[ \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\mu} \tilde{\nu}^2}{2} \ell^{2\tilde{\nu}^2} \Phi \left( -\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} \ell^{\frac{(\tau - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\nu}^2 \tilde{\mu} \tau}}}{\Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right)} =$$

$$= \frac{\left[ 208434 \left( 1 + \frac{0,5^2}{2} \right) - 130000 \right] \cdot \Phi \left( \frac{208434 - 130000}{0,5 \sqrt{208434 \cdot 130000}} \right) + \frac{208434 \cdot 0,5^2}{2} \exp \left( \frac{2}{0,5^2} \right) \cdot \Phi \left( -\frac{208434 + 130000}{0,5 \sqrt{208434 \cdot 130000}} \right) + 0,5 \sqrt{\frac{208434 \cdot 130000}{6,28}} \exp \left( -\frac{(130000 - 208434)^2}{2 \cdot 0,25 \cdot 208434 \cdot 130000} \right)}{\Phi \left( \frac{208434 - 130000}{0,5 \sqrt{208434 \cdot 130000}} \right)} =$$

$$= \frac{104488 \cdot \Phi(0,953) + 26054 \cdot 2978 \cdot \Phi(-4,112) + 32843 \cdot \exp(-0,454)}{\Phi(0,953)} =$$

$$= \frac{104488 \cdot 0,8296 + 26054 \cdot 2978 \cdot 0,00002 + 32843 \cdot 0,635}{0,8296} = 131502 \text{ год.}$$

6) Використовуючи формулу (12), обчислюють гамма-процентний залишковий ресурс:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_\gamma(\tau) &= \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - \tilde{\nu} U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{\gamma^*}^2 / 4} \right) - \tau = \\ &= 208434 \left( 1 + \frac{0,5^2 \cdot 0,8^2}{2} - 0,5 \cdot 0,8 \sqrt{1 + \frac{0,5^2 \cdot 0,8^2}{4}} \right) - 130000 = \\ &= 208434(1,08 - 0,408) - 130000 = 140084 - 130000 = 10084 \text{ год.}, \end{aligned}$$

$$7) \quad \text{де} \quad \gamma^* = \gamma \cdot \Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) = 0,95 \cdot \Phi \left( \frac{208434 - 130000}{0,5 \sqrt{208434 \cdot 130000}} \right) = 0,95 \cdot \Phi(0,953) \quad ;$$

використовуючи таблицю Б.1, визначають .

8) Обчислюють параметр масштабу розподілу залишкового напрацювання  $t_{ocl}$  (приймають  $\nu_0 = \tilde{\nu}$ ):

$$\mu_0 = \frac{\tilde{\pi}(\tau)}{1 + \nu_0^2/2} = \frac{131502}{1 + 0.25/2} = 116890 \text{ год.}$$

9) Обчислюють довірчу вірогідність оцінки параметра масштабу  $\mu_0$  (приймають:  $\xi = 0,3$ ;  $q_1 = 0,9$ ;  $m = 2$ ):

$$q = q_1 \cdot q_2 = 0,9 \cdot \Phi\left(\frac{\xi\sqrt{2m}}{\nu_0\sqrt{1+\sqrt{1+\xi^2}}}\right) = 0,9 \cdot \Phi\left(\frac{0,3 \cdot 2}{0,5 \cdot 1,43}\right) = 0,9 \cdot \Phi(0,839) = 0,72.$$

Значення довірчої вірогідності  $q_2$  може бути визначено по значеннях  $\xi = 0,3$ ,  $\nu = 0,5$ ,  $m = 2$  з таблиці В.8 ( $q_2 = 0,799 \cong 0,8$ ).

10) Набувають значення  $\gamma_p = 0,7$  і визначають значення  $\gamma_p^q = \frac{\gamma_p}{q} = \frac{0,7}{0,72} = 0,972$ . Використовуючи таблицю Б.1 визначають  $U_{\gamma_p^q} = 1,92$ .

11) Використовуючи формулу (62), обчислюють регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  ( $K_s = 1$ ):

$$\begin{aligned} \theta_{\gamma_p}(\tau) &= \frac{1}{8760 \cdot K_s} \left[ \mu_0 \left( 1 + \frac{\nu_0^2 U_{\gamma_p^q}^2}{2} - \nu_0 U_{\gamma_p^q} \sqrt{1 + \frac{\nu_0^2 U_{\gamma_p^q}^2}{4}} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{8760} \left[ 116890 \left( 1 + \frac{0,5^2 \cdot 1,92^2}{2} - 0,5 \cdot 1,92 \sqrt{1 + \frac{0,5^2 \cdot 1,92^2}{4}} \right) \right] = \\ &= \frac{116890(1,461 - 1,065)}{8760} = 5,28 \text{ років.} \end{aligned}$$

### Приклад 2

Під наглядом (експлуатація) знаходилося  $N=6$  зразків (клапан запірний) впродовж напрацювання, рівного 5000 циклів, при цьому не було

зафіксовано жодної відмови. Необхідно з довірчою вірогідністю  $q=0,9$  оцінити середній залишковий ресурс  $\pi(\tau)$  гамма-процентний залишковий ресурс  $\pi_\gamma(\tau)$  (для  $\gamma = 0,9$ ) і регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  (для  $\gamma_p = 0,8$ ), приймаючи за момент контролю  $\tau = 5000$  цикл.

### Рішення

Досліджуються механічні об'єкти, оцінка показників надійності робиться згідно із справжньою методикою.

1) Визначають коефіцієнт варіації напрацювання клапанів запірних. На підставі апріорної інформації визначено, що основними процесами руйнування, що призводять до відмов, є знос і малоциклова втома (контактна і об'ємна). При цьому встановлено, що має місце наступний пайовий розподіл відмов :

-механічний знос -  $p_1 = 0,4(40\%)$ ,  $v_1 = 0,4$  ;

-об'ємна втома -  $p_2 = 0,3(30\%)$ ,  $v_2 = 0,5$  ;

-контактна втома -  $p_3 = 0,3(30\%)$ ,  $v_3 = 0,6$  .

Виходячи з цього і відповідно до рекомендацій Додатка А, враховуючи відносний вклад процесів деградації, приймають наступну оцінку коефіцієнта варіації :

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^3 p_i^2}} = \sqrt{\frac{(0,4^2 \cdot 0,4^2 + 0,5^2 \cdot 0,3^2 + 0,6^2 \cdot 0,3^2)}{(0,4^2 + 0,3^2 + 0,3^2)}} = \sqrt{\frac{0,0805}{0,34}} = 0,49.$$

Згідно з рекомендаціями справжньої методики набувають верхнього значення коефіцієнта варіації  $\bar{v} = 0,7$ .

2) Обчислюють нижню межу емпіричної вірогідності відсутності відмови за результатами випробувань (експлуатації) по формулі (33) :



$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N} = \left(\frac{1-0,9}{2}\right)^{\frac{1}{6}} = 0,607.$$

3) Визначають, використовуючи таблицю Б.1, квантиль нормального розподілу  $U_{\underline{P}}$ , що відповідає вірогідності  $\underline{P}$ :  $U_{\underline{P}} = -0,28$ .

4) Визначають поправковий коефіцієнт  $K_1(\underline{P}, \bar{v})$  по значеннях  $\underline{P} = 0,607$  і  $\bar{v} = 0,7$  з таблиці Б.2 або відповідно до рекомендацій справжньої методики обчислюють за формулою:

$$K_1(\underline{P}, \bar{v}) = \left(1 + \bar{v}^2 U_{\underline{P}}^2 / 2 + \bar{v} U_{\underline{P}} \sqrt{1 + \bar{v}^2 U_{\underline{P}}^2 / 4}\right) = \\ \left(1 + \frac{0,7^2 \cdot 0,28^2}{2} + 0,7 \cdot 0,28 \sqrt{1 + \frac{0,7^2 \cdot 0,28^2}{4}}\right) = 1,21.$$

5) Визначають поправковий коефіцієнт  $K_2(q, \tilde{v})$  використовуючи таблицю Б.3 ( $q = 0,9$ ;  $\tilde{v} = 0,49$ ), чи відповідно до рекомендацій справжньої методики обчислюють за формулою (де  $U_q = U_{0,9} = 1,282$ ):

$$K_2(q, \tilde{v}) = \left(1 + \frac{\tilde{v}^2 U_q^2}{2} + \tilde{v} U_q \sqrt{1 + \tilde{v}^2 U_q^2 / 4}\right) = \\ = \left(1 + \frac{0,49^2 \cdot 1,282^2}{2} + 0,49 \cdot 1,282 \sqrt{1 + \frac{0,49^2 \cdot 1,282^2}{4}}\right) = 1,86.$$

6) Обчислюють оцінку параметра масштабу  $DM$ - розподілу :

$$\tilde{\mu} = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}) \cdot K_2(q, \tilde{v}) = 5000 \cdot 1,21 \cdot 1,86 = 11227 \text{ цикл.}$$

7) Обчислюють середній залишковий ресурс, використовуючи формулу (9), аналогічно пункту 5 попереднього прикладу :

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}(\tau) &= \frac{\left[ \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\mu} \tilde{\nu}^2}{2} \ell^{2\tilde{\nu}^2} \Phi \left( -\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} \ell^{-\frac{(\tau - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\nu}^2 \tilde{\mu} \tau}}}{\Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right)} = \\ &= \frac{\left[ 11227 \left( 1 + \frac{0,49^2}{2} \right) - 5000 \right] \Phi \left( \frac{11227 - 5000}{0,49 \sqrt{11227 \cdot 5000}} \right) + \frac{11227 \cdot 0,49^2}{2} \exp \left( \frac{2}{0,49^2} \right) \Phi \left( -\frac{11227 + 5000}{0,49 \sqrt{11227 \cdot 5000}} \right) + \frac{0,49 \sqrt{11227 \cdot 5000}}{\sqrt{6,28}} \exp \left[ -\frac{(11227 - 5000)^2}{2 \cdot 0,49^2 \cdot 11227 \cdot 5000} \right]}{\Phi \left( \frac{11227 - 5000}{0,49 \sqrt{11227 \cdot 5000}} \right)} = \\ &= \frac{7575 \cdot \Phi(1,696) + 5582955 \cdot \Phi(-4,42) + 1465 \cdot 0,237}{\Phi(1,696)} = \frac{7575 \cdot 0,955 + 5582955 \cdot 0,000005 + 348}{0,955} = 7970 \text{ цикл} \end{aligned}$$

8) Використовуючи формулу (12), обчислюють гамма-процентний залишковий ресурс:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_\gamma(\tau) &= \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_{\gamma^*}^2}{2} - \tilde{\nu} U_{\gamma^*} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{\gamma^*}^2 / 4} \right) - \tau = \\ &= 11227 \left( 1 + \frac{0,49^2 \cdot 1,09^2}{2} - 0,49 \cdot 1,09 \sqrt{1 + \frac{0,49^2 \cdot 1,09^2}{4}} \right) - 5000 = 6622 - 5000 = 1622 \text{ цикл}, \end{aligned}$$

де  $\gamma^* = 0,86$ .

Використовуючи таблицю Б.1, визначають:  $U_{\gamma^*} = 1,09$ .

9) Визначають регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$ :

а) Обчислюють параметр масштабу розподілу залишкового напрацювання  $t_{ocл}$  (приймають  $\nu_0 = \tilde{\nu}$ ):

$$\mu_0 = \frac{\tilde{\pi}(\tau)}{1 + \nu_0^2 / 2} = \frac{9295}{1 + 0,12} = 8298 \text{ цикл}.$$

б) Набувають значень  $q_1 = 0,9$   $q_2 = 0,9$   $\gamma_p = 0,8$  і визначають значення  $\gamma_p^q = \frac{\gamma_p}{q_1 q_2} = \frac{0,8}{0,9 \cdot 0,9} = 0,9876$ .

в) Визначають, використовуючи таблицю Б.1, квантиль нормального розподілу  $U_{\gamma_p^q}$  що відповідає вірогідності  $\gamma_p^q = 0,9876$ :  $U_{\gamma_p^q} = 2,24$ .

г) Використовуючи формулу (62), обчислюють регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  ( $K_s = 1$ ):

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \left[ \mu_0 \left( 1 + \frac{v_0^2 U_{\gamma_p^q}^2}{2} - v_0 U_{\gamma_p^q} \sqrt{1 + \frac{v_0^2 U_{\gamma_p^q}^2}{4}} \right) \right] =$$

$$= 8298 \left( 1 + \frac{0,49^2 \cdot 2,24^2}{2} - 0,49 \cdot 2,24 \sqrt{1 + \frac{0,49^2 \cdot 2,24^2}{4}} \right) = 8298(1,602 - 1,252) = 2907 \text{ цикл.}$$

### Приклад 3

Група насосних агрегатів у кількості 6 штук знаходиться в експлуатації впродовж 8 років з 01.01.1996 по 01.01.2004. У таблиці В.1 приведена статистика зафіксованих відмов.

Таблиця В.1

| № з/п | Об'єкт  | Дата реєстрації | Опис                                     | Заходи по усуненню                 | Причина  |
|-------|---------|-----------------|--|------------------------------------|--|
| 1     | ІНТО- 5 | 29.05.97        | Втрата тиску                             | Замінена проміжна труба            | Неякісно виконане на заводі-виготівнику зварне з'єднання |
| 2     | ІНТО- 1 | 18.04.98        | Сильна теча по сальнику                  | Заміна шпильок грундбукси сальника | Корозія  |
| 3     | ІНТО- 2 | 19.01.99        | Сторонній шум в електродвигуні           | Заміна підшипника                  | Заводський брак  |
| 4     | ІНТО- 2 | 23.02.99        | Збільшена теча по сальнику               | Сальник перепакований              | Втрата властивостей матеріалу                            |
| 5     | ІНТО- 3 | 28.01.01        | Текти охолоджувальної води підшипника №3 |                                    |  |

## Кінець таблиці В.1

| № з/п | Об'єкт  | Дата реєстрації | Опис                     | Заходи по усуненню         | Причина                          |
|-------|---------|-----------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 6     | ІНТО- 3 | 04.07.02        | Текти сальника           | Сальник відрегульований    | Знос                             |
| 7     | ІНТО- 3 | 11.11.02        | Свищ по імпульсній лінії | Ремонт                     | Ерозійний розмив                 |
| 8     | ІНТО- 4 | 20.02.03        | Текти по сальнику        | Заміна сальникової сорочки |                                  |
| 9     | ІНТО- 4 | 23.06.03        | Підвищена вібрація       | Центрування                | Низька якість фундаментної плити |

Насосні агрегати працюють по графіку переходів, відповідно до якого перемикання відбувається попарно, кожні 10 днів. У роботі постійно знаходяться 4 насосні агрегати, а на 2-х насосах проводиться ТЕ. Вимагається визначити середній залишковий термін служби  $T_{0cl}$  і регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma p}(\tau)$  на момент контролю 01.01.2004 р.

*Рішення.*

Досліджуються відновлювані механічні об'єкти, оцінка показників надійності робиться згідно з розділом 7 справжньої методики.

1) Визначуваний коефіцієнт варіації напрацювання на відмову насосних агрегатів згідно з рекомендаціями Додатка А. Оскільки причинами відмов є корозія, знос, ерозія, разупрочнення і відповідно до таблиці А.1 набуваємо середнього значення коефіцієнта варіації напрацювання на відмову рівним  $\tilde{v} = 0,6$ .

2) Розбиваємо загальний час спостережень 8 років на два інтервали: перший інтервал з 01.01.96 р. по 31.12.99 р.; другий інтервал з 01.01.2000 р. по 01.01.2004 р.

3) На підставі статистики відмов першого інтервалу обчислюємо значення середнього напрацювання між відмовами  $T_{02}$  для моменту експлуатації  $t_1 = 35040 \text{ год.}$ :

а) Обчислюваний сумарне напрацювання 6 насосних агрегатів за перші чотири роки:

$$S_1 = n_1 \cdot (4 \cdot 365 \cdot 24) = 140160 \text{ год.},$$

де  $n_1$  - число насосних агрегатів, що знаходяться постійно в роботі ( $n_1 = 4$ ).

б) Обчислюваний середнє напрацювання на відмову в першому інтервалі:

$$T_{02} = \frac{S_1}{m_1} = 35040 \text{ год.},$$

де  $m_1$  - число відмов в першому інтервалі ( $m_1 = 4$ ).

4) Аналогічно обчислюємо середнє напрацювання на відмову в другому інтервалі спостережень  $T_2$  для часу експлуатації  $t_2 = 70080 \text{ год.}$  ( $S_2 = S_1 = 140160$  година):

$$T_2 = \frac{S_2}{m_2} = 28032 \text{ год.},$$

де  $m_2$  - число відмов в другому інтервалі ( $m_2 = 5$ ).

5) Приймаємо як критерій граничного стану значення  $T_{дон} = 1 \text{ год} = 8760 \text{ год.}$ .

б) Обчислюємо залишковий термін служби (після 01.01.2004 р.) за формулою (46), де коефіцієнт інтенсивності експлуатації  $K_3$  врахований при визначенні часу  $t_1$  і  $t_2$ :

$$T_{0cl} = \frac{1}{8760} \left[ \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_{02}}{T_2}\right)} (\ln T_{02} - \ln T_{дон}) + t_1 \right] =$$

$$= \frac{1}{8760} \left[ \frac{(70080 - 35040)}{\ln\left(\frac{35040}{28032}\right)} (\ln 35040 - \ln 8760) + 35040 \right] = 24,7 \text{ років} .$$

7) Обчислюємо параметр масштабу розподілу залишкового терміну служби  $t_{0cl}$  (приймають  $v_{cl} = \tilde{v} / \sqrt{T_{0cl} / T_2} = 0,6 / \sqrt{24,7 \cdot 8760 / 28032} = 0,22$ ):

$$\mu_{cl} = \frac{T_{0cl}}{1 + v_{cl}^2 / 2} = \frac{24,7}{1 + 0,023} = 24,14 \text{ років} .$$

8) Обчислюють довірчу вірогідність оцінки параметра масштабу  $\mu_{cl}$  (приймають:  $\xi = 0,3$ ;  $q_1 = 0,9$ ;  $m = \min[m_1, m_2] = 4$ ):

$$q = q_1 \cdot q_2 = 0,9 \cdot \Phi\left(\frac{\xi \sqrt{2m}}{v_0 \sqrt{1 + \sqrt{1 + \xi^2}}}\right) = 0,9 \cdot \Phi\left(\frac{0,3 \cdot \sqrt{8}}{0,6 \cdot 1,43}\right) = 0,9 \cdot \Phi(0,989) = 0,9 \cdot 0,838 = 0,75.$$

Значення довірчої вірогідності  $q_2$  може бути визначено по значеннях  $\xi = 0,3$ ,  $v = 0,6$ ,  $m = 4$  з таблиці Б.8 ( $q_2 \cong 0,838$ ).

9) Набувають значення  $\gamma_p = 0,7$  і визначають значення

$$\gamma_p^q = \frac{\gamma_p}{q} = \frac{0,7}{0,75} = 0,93. \text{ Використовуючи таблицю Б.1, визначають: } U_{\gamma_p^q} = 1,48.$$

10) Обчислюють регламентований термін подальшої експлуатації  $\theta_{\gamma_p}(\tau)$  по формулі (64) з урахуванням того, що параметр масштабу  $\mu_{cl}$  розподіли залишкового терміну служби обчислюється в літах:

$$\theta_{\gamma_p}(\tau) = \mu_{cl} \left( 1 + \frac{v_{cl}^2 U^2}{2 \gamma_p^q} - v_{cl} U \sqrt{1 + \frac{v_{cl}^2 U^2}{4 \gamma_p^q}} \right) =$$

$$= 24,14 \left( 1 + \frac{0,22^2 \cdot 1,48^2}{2} - 0,22 \cdot 1,48 \sqrt{1 + \frac{0,22^2 \cdot 1,48^2}{4}} \right) = 24,14(1,053 - 0,33) = 17,45 \text{ років}$$

#### Приклад 4

Розглянемо рішення задачі прогнозування залишкового ресурсу виробів типу пневмоклапани (ПК) з електромагнітним приводом (ЕМП).

Результати одночасних вимірів ресурсного (визначального) і діагностичних параметрів виробів ПК представлені в таблиці В.2, де позначено:  $x_1$  - відносний час спрацьовування ЕМП при відкритті і закритті ПК ( $x_1 = \frac{t_{cp}}{t_{0cp}}$  тут

$t_{0cp}$  і  $t_{cp}$  - відповідно, час спрацьовування в початковий (початковий) і поточний момент напрацювання;  $\Delta x_{1i}$  - приріст параметра  $x_1$  за  $i$ -й інтервал);

$x_2$  - відносна негерметична ПК по затвору ( $x_2 = \frac{h}{h_0}$  тут  $h_0$  і  $h$  - відповідно,

негерметична в початковий (початковий) і поточний момент напрацювання;  $\Delta x_{2i}$  - приріст параметра  $x_2$  за  $i$ -й інтервал);  $x_3$  - довжина штока якоря у

відносних одиницях ( $x_3 = \frac{L}{L_0}$  тут  $L_0$   $L$  - відповідно, довжина штока в

початковий (початковий) і поточний момент напрацювання;  $\Delta x_{3i}$  - приріст параметра  $x_3$  за  $i$ -й інтервал). Параметр  $x_3$  представляється ресурсним

(визначальним) параметром, при цьому раніше встановлено, що (при

початковій довжині штока  $L_0 = 50$  мм) граничне зменшення довжини штока  $\Delta L = \Pi = 0,2$  мм Таким чином  $x_{3\text{lim}} = 1,004$ . Інтервал  $\Delta t = 10^5$  циклів прийнятий з міркувань, вказаних в 7.1,2 справжнього стандарту.

Необхідно визначити показники залишкового ресурсу ПК на момент напрацювання  $t_u = 1000000$  цикл.

Таблиця В.2 - Результати попередніх випробувань ПК

| Напрацюван<br>ня, в циклах<br>$N$ | Час спрацьовування<br>ЕМП |                 | Негерметична ПК |                 | Довжина штока якоря |                 |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                                   | $x_1$                     | $\Delta x_{1i}$ | $x_2$           | $\Delta x_{2i}$ | $x_3$               | $\Delta x_{3i}$ |
| 100000                            | 1,006                     | 0,006           | 1,022           | 0,022           | 1,0001              | 0,0001          |
| 200000                            | 1,010                     | 0,004           | 1,028           | 0,006           | 1,0002              | 0,0001          |
| 300000                            | 1,012                     | 0,002           | 1,045           | 0,017           | 1,0006              | 0,0004          |
| 400000                            | 1,017                     | 0,005           | 1,061           | 0,016           | 1,0008              | 0,0002          |

Кінець таблиці В.2

| Напрацюван<br>ня, в циклах<br>$N$ | Час спрацьовування<br>ЕМП |                 | Негерметична ПК |                 | Довжина штока якоря |                 |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                                   | $x_1$                     | $\Delta x_{1i}$ | $x_2$           | $\Delta x_{2i}$ | $x_3$               | $\Delta x_{3i}$ |
| 500000                            | 1,023                     | 0,006           | 1,078           | 0,017           | 1,0012              | 0,0004          |
| 600000                            | 1,033                     | 0,010           | 1,102           | 0,024           | 1,0014              | 0,0002          |
| 700000                            | 1,036                     | 0,003           | 1,130           | 0,028           | 1,0017              | 0,0003          |
| 800000                            | 1,040                     | 0,004           | 1,180           | 0,050           | 1,0019              | 0,0002          |
| 900000                            | 1,047                     | 0,007           | 1,430           | 0,250           | 1,0024              | 0,0005          |
| 1000000                           | 1,053                     | 0,006           | 1,600           | 0,170           | 1,0031              | 0,0007          |

### Рішення

1) Оскільки основними процесами руйнування, ПК, що призводять до відмов елементів, з ЕМП, являються знос, малоциклова втома (контактна і об'ємна), а також відмови електричних компонентів вузла, то в якості теоретичної моделі розподілу ресурсу ПК з ЕМП як для загальнішого випадку приймають  $DN$ -розподілу.



2) Використовуючи результати попередніх випробувань ПК (дані таблиці В.1), зокрема, результати вимірів визначального параметра ( $x_3$ ), отримують наступні оцінки характеристик зміни визначального параметра :

Оцінку середньої швидкості зміни визначального параметра обчислюють за формулою (49) справжньої методики :

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{\tilde{\Delta}\varphi}{\Delta t} = \frac{0,00031}{100000} = 3,1 \cdot 10^{-9} \text{ мм/цикл.}$$

Оцінку коефіцієнта варіації приростів (швидкості зміни визначального параметра) обчислюють за формулою (50) :

$$v_{x_3} = v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - \tilde{\Delta}\varphi)^2} / \tilde{\Delta}\varphi = 0,53.$$

Аналогічно, використовуючи формулу (50), отримують оцінки коефіцієнтів варіації приростів діагностичних параметрів :

$$v_{x_1} = 0,43; \quad v_{x_2} = 1,26.$$

Згідно з запропонованою методикою в якості оцінки параметра форми розподілу залишкового ресурсу приймають оцінку коефіцієнта варіації приростів визначального (ресурсного) параметра.

3) Оцінка середнього ресурсу ПК :

$$T_{cp} = \frac{(\Pi - \Pi_o)}{a} = \frac{(1,004 - 1)}{3,1 \cdot 10^{-9}} = 1,29 \cdot 10^6 \text{ цикл}$$

де  $\Pi_o$  - початкового значення визначального параметра набуває рівним одиниці (приріст дорівнює нулю).

4) Оцінка середнього залишкового ресурсу (після напрацювання  $t_{10} = 10^6$  цикл і значення визначального параметра  $\Pi_1 = 1,0031$ ) робиться по формулі:

$$\pi(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} = \frac{(1,004 - 1,0031)}{3,1 \cdot 10^{-9}} = 426775 \text{ цикл.}$$

- 5) Оцінка гамма-процентного залишкового ресурсу ( для  $\gamma = 0,9$ ):

$$\pi_{\gamma}(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} x \left( 1 - \frac{\gamma}{100}; \nu \right) = 198706 \text{ цикл.}$$

- 6) Оцінка вірогідності безвідмовної роботи за  $\tau_{зад} = 10^5$  цикл (після  $t_{10} = 10^6$  цикл):

$$R(\tau_{зад}) = \Phi \left( \frac{\Pi - \Pi_1 - a\tau_{зад}}{\nu \sqrt{a\tau_{зад}(\Pi - \Pi_1)}} \right) - \exp(2\nu^{-2}) \Phi \left( -\frac{\Pi - \Pi_1 + a\tau_{зад}}{\nu \sqrt{a\tau_{зад}(\Pi - \Pi_1)}} \right) = \\ = \Phi(2,1075) - 1236 \cdot \Phi(-4,322) = 0,9823 - 0,0096 = 0,973 .$$

### Приклад 5

У таблиці В.2 представлені результати вимірів діагностичних параметрів (часу спрацьовування ЕМП  $x_1$  і негерметичній  $x_2$ ) в процесі експлуатації ПК такого ж типу, що і раніше досліджені (таблиця В.2). Необхідно, використовуючи результати попередніх досліджень (таблиця В.2) і результати даних в таблиці В.3, отримати оцінки залишкового ресурсу ПК.

Таблиця В.3 - результати виміру діагностичних параметрів в процесі експлуатації ПК

|                              |        |        |        |         |
|------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| Напрацювання в циклах<br>$N$ | 650000 | 800000 | 950000 | 1100000 |
| Час спрацьовування $x_1$     | 1,035  | 1,042  | 1,047  | 1,050   |
| Негерметична ПК $x_2$        | 1,083  | 1,098  | 1,163  | 1,402   |

*Рішення*

1) Використовуючи результати попередніх досліджень ПК (таблиця В.2), складають систему диференціальних рівнянь виду (54) і, інтегруючи згідно з рекомендаціями справжньої методики, обчислюють граничні значення діагностичних параметрів  $(x_{1\text{lim}}, x_{2\text{lim}})$ , що відповідають граничному значенню визначального (ресурсного) параметра  $(x_{3\text{lim}})$ :

$$x_{1\text{lim}} = 1,068; \quad x_{2\text{lim}} = 1,965; \quad x_{3\text{lim}} = 1,004.$$

2) Приймають як моделі зміни параметрів  $(x_1, x_2, x_3)$  моделі, отримані в результаті розв'язування системи рівнянь (54) з урахуванням цих таблиць. Використовуючи результати вимірів діагностичних параметрів (таблиця В.3), будується система динамічних рівнянь, аналогічна (56). Інтегруючи отриману систему рівнянь, визначають значення напрацювань  $(t_{x_{1\text{lim}}}, t_{x_{2\text{lim}}})$ , за які діагностичні параметри досягають свої граничні значення:

$$t_{x_{1\text{lim}}} = 1,3226 \cdot 10^6 \text{ цикл}; \quad t_{x_{2\text{lim}}} = 4,9 \cdot 10^7 \text{ цикл}.$$

3) Використовуючи співвідношення (31), обчислюють оцінку залишкового ресурсу :

$$\pi(\tau) = \min\{(t_{x_{1\text{lim}}} - t_{uzm}); (t_{x_{2\text{lim}}} - t_{uzm})\} = 222600 \text{ цикл}.$$

4) Визначають параметр масштабу розподілу залишкового ресурсу (ресурсу після напрацювання  $t_4 = 1,1(10^6 \text{ цикл})$ , при цьому вважають, що параметр форми співпадає з оцінкою коефіцієнта варіації  $v$  при попередніх випробуваннях:

$$\mu_o = \pi(\tau) = 195263 \text{ цикл.}$$

Далі можна вчислити необхідні показники залишкового ресурсу.  
Зокрема, гамма-відсотковий залишковий ресурс (для  $\gamma = 0,9$ ):

$$\pi_\gamma(\tau) = \mu x\left(1 - \frac{\gamma}{100}; \nu\right) = 195263 \cdot x(0,1; 0,53) = 100319 \text{ цикл.}$$

Вірогідність безвідмовної роботи, наприклад, за  $\tau_{зад} = 75000$  цикл:

$$\begin{aligned} P(\tau_{зад}) &= \Phi\left(\frac{\mu_o - \tau_{зад}}{\nu\sqrt{\mu_o\tau_{зад}}}\right) - \exp(2\nu^{-2}) \Phi\left(-\frac{\mu_o + \tau_{зад}}{\nu\sqrt{\mu_o\tau_{зад}}}\right) = \\ &= \Phi(1,875) - 1236 \cdot \Phi(-4,214) = 0,954. \end{aligned}$$

---

Код УКНД 21.020

**Ключові слова:** надійність, відмова, ймовірно-фізичні моделі відмов, граничний стан, цензурована вибірка, залишковий ресурс, залишковий термін служби, регламентований термін експлуатації, коефіцієнт варіації.

---

|   |       |                  |
|---|-------|------------------|
| Керівник<br>ІПММС НАН України,<br>академік НАНУ | _____ | А.О. Морозов     |
| Керівник розробки,<br>д.т.н                     | _____ | В.П. Стрельніков |
| Відповідальні виконавці                         |       |                  |
| н.с.  | _____ | П.В. Стрельніков |
| головний математик                              | _____ | М.М. Редковська  |
| головний програміст                             | _____ | Є.О. Лічман      |