



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

Надійність техніки.

**ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ І (АБО)
ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ МАЛОЇ
СТАТИСТИКИ ВІДМОВ**

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	IV
1 Сфера застосування	1
2 Нормативні посилання	1
3 Терміна та визначення понять	2
4 Позначки та скорочення	3
5 Загальні стани	5
6 Вибір плану випробувань на надійність	7
7 Планування випробувань на надійність	9
8 Визначення обсягу випробувань	10
9 Оцінювання показників надійності в загальному випадку	11
10 Визначення відносної похибки оцінок показників надійності	18
11 Оцінювання показників надійності при одноразовому цензуруванні і наявності відмов (мала вибірка)	19
12 Оцінювання показників надійності при багаторазовому цензуруванні і наявності відмов (мала вибірка)	20
13 Оцінювання показників надійності при одноразовому цензуруванні та відсутності відмов (мала вибірка)	22
14 Оцінювання показників надійності при спостереженні відмов в процесі експлуатації відновлюваних об'єктів	23
Додаток А Оцінювання показників надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації при DN - розподілі	24
Додаток Б Теоретичні основи стандарту	33
Додаток В Рекомендації з оцінки коефіцієнта варіації розподілу наробітку до відмови (ресурсу)	42
Додаток Г Таблиці для обчислення показників надійності	45
Додаток Д (довідковий). Приклади застосування нормативного матеріалу	47

ВСТУП

Необхідність розробки справжнього стандарту обумовлена тим, що існуючі методики оцінки показників надійності за статистичними даними про відмови об'єктів вимагають значної статистики відмов, якої, як правило, не буває. Дослідникам необхідно робити оцінки і прогнозувати показники надійності об'єктів в умовах обмеженої статистики відмов. Стандарт, що розробляється, ґрунтований на використанні найбільш адекватних імовірісно-фізичних моделей відмов (дифузійних розподілів), дозволяє вирішувати поставлену задачу і прогнозувати показники надійності об'єктів в умовах малої або навіть відсутності статистики відмов за рахунок використання апріорної інформації про фізичні процеси деградації, об'єктів, що обумовлюють відмови.

Метою пропонованого стандарту є розробка методик оцінки показників надійності (безвідмовності, довговічності і інших показників надійності) технічних систем на основі нової технології надійності - імовірісно-фізичних методів дослідження надійності. Використання імовірісно-фізичних моделей відмов дослідження надійності технічних об'єктів, зокрема двохпараметричних дифузійних розподілів, призводить до наступних результатів: використання методів розрахунку на основі адекватніших двохпараметричних моделей відмов призводить до підвищення точності оцінок показників надійності технічних систем; при експериментальній оцінці (чи в результаті спостережень в процесі експлуатації) призводить до істотного скорочення об'єму випробувань або об'єму спостережень (зменшенню кількості випробовуваних (спостережуваних) зразків на 30-50% для заданої достовірності і точності), а також до підвищення точності оцінок показників надійності. Точніша оцінка надійності експлуатованих систем дозволяє забезпечити заданий рівень надійності, приймати ефективніші рішення про терміни подальшої експлуатації і вжиття заходів по забезпеченню експлуатаційної надійності.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ І (АБО) ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ МАЛОЇ СТАТИСТИКИ ВІДМОВ

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИКИ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ И (ИЛИ) ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ МАЛОЙ СТАТИСТИКИ ОТКАЗОВ

SAFETY EQUIPMENT ASSESSMENT AND FORECASTING RELIABLE TEST RESULTS AND (OR) OPERATION IN A LOW FAILURE STATISTICS

Чинний від

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт поширюється на механічне, електромеханічне, тепломеханічне устаткування (насосні агрегати, турбогенератори, компресори, арматуру, посудини, трубопроводи і інші вироби), електронне, електротехнічне устаткування (системи контролю і управління, електродвигуни, трансформатори, вимикачі і інші вироби) і їх складові частини, які розглядаються з точки зору надійності як самостійні одиниці (далі - об'єкти). Стандарт встановлює методи вибору планів і об'ємів випробувань, оцінки показників надійності за результатами випробувань і (чи) експлуатації.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цьому стандарті є посилання на такі стандарти та нормативні документи :

ДСТУ

ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) Надійність техніки. Моделі відмов.

Основні положення

ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення

ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

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

На додаток до них використовуються наступні визначення:

3.1 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

3.2 напрацювання до цензурування

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

3.3 цензурована вибірка

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

3.4 Одноразово цензурована вибірка

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

3.5 багаторазово цензурована вибірка

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

3.6 параметр масштабу

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

3.7 параметр форми

Параметр функції розподілу напрацювання повністю (на відмову), що характеризують вид і форму розподілу.

Усі аналітичні вирази для параметрів і показників надійності відповідають ДСТУ 3433, ГОСТ 27.005 і ДСТУ 3004.

4 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

\tilde{R} - точкова оцінка показника надійності R ;

\underline{R} - нижня довірча межа показника надійності R ;

\overline{R} - верхня довірча межа показника надійності R ;

q - довірча вірогідність, що відповідає двосторонньому довірчому інтервалу;

ξ - 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] чи [NMT] і $m = r$ якщо діє план [NUr] чи [NM r];

ДСТУ

t_i - окремі значення випадкової величини (напрацювання до відмови, напрацювання між відмовами, ресурсу);

S - сумарне напрацювання усіх випробовуваних зразків;

τ_i - окремі значення напрацювання до цензурування;

T, t_u - тривалість випробувань (спостережень);

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

\bar{T}_{cp} - верхня довірча межа середнього напрацювання;

\underline{T}_{cp} - нижня довірча межа середнього напрацювання;

\tilde{T}_γ - точкова оцінка гамма-процентних показників надійності T_γ ;

\bar{T}_γ - верхня довірча межа гамма-процентного напрацювання (ресурсу);

\underline{T}_γ - нижня довірча межа гамма-процентного напрацювання (ресурсу);

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

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

$\bar{P}(t_3)$ - верхня довірча межа вірогідності безвідмовної роботи;

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

$\tilde{P}(t, t_{3ad})$ - точкова оцінка вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі напрацювання $(t, t+t_{3ad})$;

$\bar{P}(t, t_{3ad})$ - верхня довірча межа вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі напрацювання $(t, t+t_{3ad})$;

$\underline{P}(t, t_{3ad})$ - нижня довірча межа вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі напрацювання $(t, t+t_{3ad})$;

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

U_γ - квантиль нормального розподілу рівня γ ;

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

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

$\tilde{\mu}, \tilde{\nu}$ - оцінки параметрів дифузійних розподілів.

5 ЗАГАЛЬНІ СТАНИ

5.1 Переважаючими процесами руйнування, що призводять до відмов (граничному стану) механічного, електромеханічного, тепломеханічного устаткування являються невідновні деградаційні процеси типу об'ємна і контактна втома, механічний знос, корозія і старіння. На підставі рекомендацій стандартів ДСТУ 3433, ГОСТ 27.005 і ДСТУ 3004 в якості теоретичної моделі відмов вищезгаданого устаткування приймають дифузійний монотонний розподіл (DM -розподіл).

Основні характеристики DM -розподілу :

Функція розподілу (модель відмов) :

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

Вірогідність безвідмовної роботи (модель надійності) :

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (2)$$

Середнє напрацювання до відмови (середній ресурс) :

$$T_{cp} = \mu(1 + \nu^2/2). \quad (3)$$

Гамма-процентна напрацювання до відмови (гамма-процентний ресурс)

:

$$T_{\gamma} = \mu \left(1 + \frac{\nu^2 U_{\gamma}^2}{2} - \nu U_{\gamma} \sqrt{1 + \frac{\nu^2 U_{\gamma}^2}{4}} \right). \quad (4)$$

Вірогідність безвідмовної роботи в заданому інтервалі $(t, t + t_{зад})$:

$$P(t, t_{зад}) = \frac{P(t + t_{зад})}{P(t)} = \frac{\Phi\left(\frac{\mu - t - t_{зад}}{\nu\sqrt{\mu(t + t_{зад})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right)}, \quad (5)$$

ДСТУ

де t - напрацювання з початку експлуатації для невідновних об'єктів або напрацювання після чергового відновлення для відновлюваних об'єктів;
 $t_{зад}$ - заданий інтервал безвідмовного напрацювання.

5.2 Переважаючими процесами руйнування, що призводять до відмов (граничному стану) електронного і електротехнічного устаткування, є невідновні деградаційні процеси типу об'ємна і контактна втома, старіння, а також електричні процеси. На підставі рекомендацій стандартів ДСТУ 3433, ГОСТ 27.005 і ДСТУ 3004 в якості теоретичної моделі відмов електронного і електротехнічного устаткування приймають дифузійний немонотонний розподіл (DN - розподіл).

Основні характеристики DN - розподілу приведені в Додатку А.

5.3 Розрахункові (прогнозовані) оцінки показників надійності на основі певних статистичних даних про відмови практично співпадають, якщо застосовують в якості теоретичних моделей відмов DM - розподіл або DN - розподіл.

5.4 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.

5.5 Під оцінками показників надійності розуміють точкову і (чи) інтервальну (межі довірчого інтервалу, який із заданою вірогідністю містить істинне значення показника) оцінки показника.

5.6 Для обчислення оцінок показників надійності проводять наступні роботи:

- вибір плану випробувань на надійність;
- планування випробувань (спостережень);
- збір необхідної інформації;
- статистичну обробку інформації.

5.7 У технічно обґрунтованих випадках допускається не проводити планування випробувань (спостережень). У разі фіксованого об'єму вибірки (N) планування випробувань зводиться до визначення необхідного напрацювання кожного зразка (напрацювання до відмови, до цензурування), відповідної заданої точності і довірчої вірогідності оцінки показника надійності.

5.8 При експлуатаційних спостереженнях, як правило, не планують об'єм спостережень, вид цензурування, а обробляють конкретні спостережувані статистичні дані про відмови за певний період експлуатації. 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).

6 ВИБІР ПЛАНУ ВИПРОБУВАНЬ НА НАДІЙНІСТЬ

6.1 План випробувань на надійність встановлює число об'єктів випробувань, порядок проведення випробувань (з відновленням працездатного стану об'єкту після відмови, заміною об'єкту, що відмовив, або без заміни і відновлення) і критерій їх припинення.

Об'єктами випробувань (спостережень) є однотипні зразки, що не мають конструктивних або інших відмінностей, виготовлених за єдиною технологією і випробовуваних в ідентичних умовах.

Тривалість або об'єм роботи (напрацювання) зразків залежно від типу об'єктів і умов їх експлуатації може вимірюватися в годиннику або циклах.

6.2 У цьому нормативному документі розглядаються наступні види планів випробувань.

6.2.1 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,

ДСТУ

коли число зразків, що відмовили, досягає r . Справжній план випробувань породжує одноразово цензуровану вибірку.

Примітка. При $r = N$ маємо план [NUN] (повна вибірка).

6.2.2 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. Справжній план випробувань породжує одноразово цензуровану вибірку.

6.2.3 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 . Справжній план випробувань узагальнює плани випробувань [NRr] і [NRT] і породжує багаторазово цензуровану вибірку.

6.2.4 План випробувань [NMT] - план випробувань, згідно з яким одночасно випробовують N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань (спостережень), відновлюють, але не замінюють, кожен об'єкт випробовують впродовж напрацювання T .

6.2.5 План випробувань [NM r] - план випробувань, згідно з яким одночасно випробовують N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань (спостережень), відновлюють, випробування припиняють, коли сумарне по усіх об'єктах число відмов досягає r .

6.3 Вибір планів випробувань залежить від типу об'єкту випробувань, цілей випробувань, оцінюваних показників надійності, умов випробувань і інших техніко-економічних чинників.

При експлуатаційних спостереженнях з метою оцінки і уточнення показників надійності (середнього напрацювання до відмови (ресурсу),

гамма-процентного напрацювання (ресурсу)) найбільш прийнятними видаються плани типу $[NRz]$, а при оцінці середніх показників напрацювання на відмову відновлюваних об'єктів (чи середнього часу відновлення) використовують плани випробувань $[NMT]$ чи $[NM r]$.

7 ПЛАНУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ НА НАДІЙНІСТЬ

7.1 Планування випробувань на надійність передбачає визначення необхідного об'єму випробувань для обчислення оцінок показників надійності із заданою точністю (відносною помилкою ξ у оцінці показника надійності) і достовірністю (довірчою вірогідністю q).

7.2 Під об'ємом випробувань розуміють для планів:

- $[NUN]$ - число об'єктів (зразків) випробувань N ;
- $[NUr]$ - число об'єктів випробувань N і число відмов (граничних станів) r випробовуваних об'єктів;
- $[NUT]$ - число об'єктів випробувань N і тривалість випробувань T ;
- $[NRr]$ - число об'єктів випробувань N і число відмов (граничних станів) r .
- $[NRT]$ - число об'єктів випробувань N і тривалість випробувань T .
- $[NMT]$ - число об'єктів випробувань N тривалість випробувань T і вибіркові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_d ;
- $[NM r]$ - число об'єктів випробувань N число відмов r і вибіркові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_r .

7.3 Початковими даними для розрахунку об'єму випробувань служать:

- довірча вірогідність q інтервальної оцінки відповідного показника надійності;
- відносна помилка ξ оцінки відповідного показника надійності;
- коефіцієнт варіації ν розподіли випадкової величини (напрацювання, ресурсу).

ДСТУ

7.4 Довірчу вірогідність q рекомендується вибирати з ряду: 0,90; 0,95; 0,98; 0,99.

Граничну відносну помилку (відносну помилку) ξ зважаючи на специфіку об'єктів, рекомендується вибирати з ряду: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4.

Примітка. Набуття значення відносної помилки ξ більше 0,4, а також значення довірчої вірогідності менше 0,9, повинно бути обґрунтовано і погоджено із замовником.

7.5 На підставі результатів випробувань і експлуатації механічного, електромеханічного і тепломеханічного устаткування встановлено, що з довірчою вірогідністю не менше $q = 0,9$ 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 стандарту ГОСТ 27.005. Для ряду технічних об'єктів встановлені значення коефіцієнтів варіації ресурсу приведені в Додатку Б.

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

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}},$$

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 $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

8 ВИЗНАЧЕННЯ ОБСЯГУ ВИПРОБУВАНЬ

8.1 Число зразків N яке необхідно поставити на випробування відповідно до необхідних значень достовірності оцінки (q, ξ) , визначають по формулі:

$$N = \left(\frac{vU_q}{\xi} \right)^2 (1 + \sqrt{1 + \xi^2}) / 2. \quad (6)$$

Якщо використовують плани $[NMT]$, $[NRr]$ чи $[NMr]$, необхідне число відмов m також обчислюють за формулою (6), замінюючи значення $N = m$.

Нижче в таблиці 1 приведені значення $N(m)$ для типових початкових даних (для довільних даних розрахунок N чи m роблять по формулі (6) з округленням до цілого числа).

Примітка 1. Значення N (число зразків) по формулі (6) обчислюють при використанні планів : $[NUN]$, $[Nur]$, $[NUT]$.

Примітка 2. Значення m (число відмов) обчислюють за формулою (6) при використанні планів : $[NMT]$, $[NMr]$, $[NRr]$.

Таблиця 1 - Число зразків N (чи число відмов m), необхідних для оцінки параметра масштабу DM - розподілу

ξ	q	Значення $N(m)$ при ν						
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,2	0,95	6	11	17	25	33	44	55
	0,90	4	7	10	15	20	27	34
0,3	0,95	3	5	8	11	15	20	25
	0,90	2	3	6	7	9	12	15
0,4	0,95	2	3	4	6	9	11	14
	0,90	1	2	3	4	5	7	9

9 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ В ЗАГАЛЬНОМУ ВИПАДКУ

9.1 Загальний порядок оцінки показників надійності полягає в наступному:

- на підставі прийнятого плану спостережень і наявних статистичних даних визначають параметр масштабу $\tilde{\mu}$ розподілу напрацювання до відмови (на відмову);

ДСТУ

- на підставі набутого значення довірчої вірогідності q статистичних даних визначають граничні оцінки параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$;

- на підставі апріорної інформації (при малій вибірці) про процеси деградації, використовуючи таблиці, що додаються, визначають значення параметра форми $\tilde{\nu}$ ($\underline{\nu}, \bar{\nu}$) розподіли напрацювання до відмови (на відмову);

- далі, отримавши оцінки параметрів $(\underline{\mu}, \tilde{\mu}, \bar{\mu}, \underline{\nu}, \tilde{\nu}, \bar{\nu})$, по приведених формулах обчислюють усі необхідні показники надійності (точкові оцінки і довірчі межі) середнього напрацювання до відмови (на відмову), вірогідність безвідмовної роботи за заданий інтервал і так далі.

9.2 Початковими даними для оцінки показників надійності служать:

9.2.1 При плані випробувань [NUN]:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_N ;
- об'єм вибірки N .

9.2.2 При плані випробувань [NUr]:

- вибіркові значення напрацювання до відмови ресурсу t_1, t_2, \dots, t_r ;
- число відмов r ;
- об'єм вибірки N .

9.2.3 При плані випробувань [NUT]:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_d ;
- тривалість випробувань T ;
- об'єм вибірки N .

9.2.4 При плані випробувань [NRz]:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_r ;
- вибіркові значення напрацювання зразків (напрацювання до цензурування), що не відмовили $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$;

- число відмов r ;
- число цензурованих n ;
- об'єм вибірки N .

9.2.5 При плані випробувань [NMT]:

- вибірккові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_d ;
- тривалість випробувань T ;
- об'єм вибірки N .

9.2.6 При плані випробувань [NMr]:

- вибірккові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_r ;
- число відмов r ;
- об'єм вибірки N .

9.3 За результатами випробувань невідновних об'єктів обчислюють точкові оцінки параметрів DM - розподілу.

9.3.1 При достатній статистиці ($r > 6$) точкові оцінки параметрів DM - розподілу обчислюють одним з наступних методів.

Найбільш ефективними оцінками параметрів будь-яких розподілів видаються максимально-правдоподібні оцінки. Максимально-правдоподібні оцінки є спроможними, незміщеними, достатніми і такими, що мають найменшу дисперсію. Проте максимально-правдоподібні оцінки параметрів двохпараметричних розподілів представляються досить складними при їх обчисленні.

Простішими оцінками параметрів двохпараметричних розподілів видаються моментні оцінки, а також оцінки, отримані методом квантилів, які є спроможними і які успішно використовують в інженерній практиці.

9.3.1.1 При плані випробувань [NUN] максимально-правдоподібні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = G + Q - \sqrt{Q^2 - \tilde{s}G + G^2}; \quad (7)$$

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\tilde{\mu}/G + \tilde{s}/\tilde{\mu} - 2}, \quad (8)$$

$$\text{де } \tilde{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad G = N \left(\sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right)^{-1}; \quad Q = N \left[2 \sum_{i=1}^N (\tilde{\mu} + t_i)^{-1} \right]^{-1}.$$

Моментні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = \frac{5\tilde{s}^2 - D}{4\tilde{s} + \sqrt{\tilde{s}^2 + 3D}}; \quad (9)$$

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{2(\tilde{s}\sqrt{\tilde{s}^2 + 3D + D - \tilde{s}^2})}{5\tilde{s}^2 - D}}, \quad (10)$$

де $D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \tilde{s})^2$.

9.3.1.2 При планах випробувань [NRr] чи [NRT] (багаторазово цензурована вибірка) максимально-правдоподібні оцінки параметрів DM -розподілу обчислюють, вирішуючи систему рівнянь :

$$\left\{ \begin{aligned} & v^2 - 2v^2 \mu K_r - \frac{m'_1}{\mu} + \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{-\frac{v^2}{2} DM(\tau_j; \mu, v) + \frac{v^2 \mu'_{1j}}{2\mu} + \mu \mu''_{-1j} - \frac{\mu''_{1j}}{\mu}}{1 - DM(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0; \\ & 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{(2 + v^2) DM(\tau_j; \mu, v) - \mu \mu''_{-1j} - \frac{\mu''_{1j}}{\mu}}{1 - DM(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

де $m'_1 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i$; $m'_{-1} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{t_i}$;

$$\mu'_{1j} = \int_0^{t_j} t f_N(t) dt; \quad \mu'_{-1j} = \int_0^{t_j} \frac{1}{t} f_N(t) dt; \quad DM(\tau_j; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\tau_j - \mu}{v\sqrt{\mu\tau_j}}\right);$$

$$DN(\tau_j; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\tau_j - \mu}{v\sqrt{\mu\tau_j}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\tau_j + \mu}{v\sqrt{\mu\tau_j}}\right); \quad K_r = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{t_i + \mu};$$

$$\mu''_{1j} = \int_{-\infty}^{\tau_j} t f_M(t; \mu, v) dt;$$

$$\mu''_{-1j} = \int_{-\infty}^{\tau_j} \frac{1}{t} f_M(t; \mu, v) dt; \quad f_M(t) = \frac{(t + \mu)}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right];$$

$$f_N(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right];$$

$f_M(t), f_N(t)$ - щільність DM - і DN -розподіл.

9.3.1.3 Максимально правдоподібні оцінки параметрів DM - розподілу при одноразовому усіканні вибірки (плани випробувань $[NUT]$ чи $[NUT]$) обчислюють, вирішуючи наступну систему рівнянь :

$$\begin{cases} v^2 - 2v^2 \mu K_r - \frac{m'_1}{\mu} + \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1-DM(t_r; \mu, v)]} \left[-\frac{v^2}{2} DN(t_r; \mu, v) + \frac{v^2 \mu'_1}{2\mu} + \mu \mu''_{-1} - \frac{\mu''_1}{\mu} \right] = 0; \\ 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1-DM(t_r; \mu, v)]} \left[(2+v^2) DM(t_r; \mu, v) - \mu \mu''_{-1} - \frac{\mu''_1}{\mu} \right] = 0. \end{cases} \quad (12)$$

де $m = r$ - число відмов до моменту усікання за час випробувань (спостережень) за планом $[NUT]$ чи $m = d$ - число відмов при плані випробувань (спостережень) $[NUT]$ (при цьому $t_r = t_d$).

9.3.2 При одиничних відмовах ($r \leq 6$) параметр форми v DM - розподілу визначають згідно з рекомендаціями 7.5, а точкову оцінку параметра масштабу μ обчислюють за формулою (метод квантилів) :

$$\tilde{\mu} = \left[\sum_{j=1}^w k_j t_j \left(1 + \tilde{v}^2 U_{F_j}^2 / 2 - \tilde{v} U_{F_j} \sqrt{1 + \tilde{v}^2 U_{F_j}^2 / 4} \right) \right] / \sum_{j=1}^w k_j \quad (13)$$

де k_j - число співпадаючих напрацювань 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 ;

w - число прийнятих інтервалів.

9.4 Для планів випробувань $[NMT]$ чи $[NMT]$ відновлюваних об'єктів вибірково оцінку параметра масштабу $\tilde{\mu}$ DM - розподілу напрацювання на відмову обчислюють за формулою:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m(1 + \tilde{v}^2 / 2)}, \quad (14)$$

де $S = \sum_{i=1}^N T_i$ - сумарне напрацювання усіх випробовуваних зразків.

9.5 Обчислюють довірчі межі параметрів DM - розподілу.

9.5.1 При достатній статистиці ($N > 6$) і плані випробувань [NUN] нижні довірчі межі параметрів рівня q обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} \left[1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2N} - \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{N}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / N} \right]; \quad (15)$$

$$\underline{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2}{4N} - \frac{U_q}{4N} \sqrt{[8N + (1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2] (1 + 2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (16)$$

Верхні довірчі межі параметрів DM - розподілу обчислюють по формулах:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} \left[1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2N} + \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{N}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / N} \right]; \quad (17)$$

$$\bar{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2}{4N} + \frac{U_q}{4N} \sqrt{[8N + (1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2] (1 + 2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (18)$$

9.5.2 При достатній статистиці ($m > 6$) і планах випробувань [NUr], [NUT] чи [NMT], [NM r] нижні довірчі межі параметрів обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} \left[1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2m} - \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{m}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / m} \right]; \quad (19)$$

$$\underline{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2}{4m} - \frac{U_q}{4m} \sqrt{[8m + (1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2] (1 + 2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (20)$$

Верхні довірчі межі параметрів DM - розподілу обчислюють по формулах:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} \left[1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2m} + \frac{\tilde{\nu} U_q}{2\sqrt{m}} \sqrt{4 + \tilde{\nu}^2 U_q^2 / m} \right]; \quad (21)$$

$$\bar{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2}{4m} + \frac{U_q}{4m} \sqrt{[8m + (1 + 2\tilde{\nu}^2) U_q^2] (1 + 2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (22)$$

9.5.3 При одиничних відмовах ($N \leq 6$, $m \leq 6$) граничні оцінки параметра форми ν DM - розподілу визначають відповідно до рекомендацій 7.5, а довірчі межі параметра масштабу μ обчислюють за формулами (15), (17) або (19), (21).

9.6 Обчислення точкових оцінок і довірчих меж визначуваного показника надійності.

Точкові і довірчі межі показників надійності обчислюють на підставі точкових і граничних оцінок параметрів розподілів ($\underline{\mu}, \tilde{\mu}, \bar{\mu}, \underline{\nu}, \tilde{\nu}, \bar{\nu}$).

9.6.1 Точкову оцінку і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu} (1 + \tilde{\nu}^2 / 2); \quad (23)$$

$$\underline{T}_{cp} = \underline{\mu} (1 + \underline{\nu}^2 / 2); \quad (24)$$

$$\bar{T}_{cp} = \bar{\mu} (1 + \bar{\nu}^2 / 2). \quad (25)$$

9.6.2 Точкову оцінку і довірчі межі гамма-процентного напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\tilde{T}_{\gamma} = \tilde{\mu} (1 + \tilde{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 2 - \tilde{\nu} U_{\gamma} \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 4}); \quad (26)$$

$$\underline{T}_{\gamma} = \underline{\mu} (1 + \underline{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 2 - \underline{\nu} U_{\gamma} \sqrt{1 + \underline{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 4}); \quad (27)$$

$$\bar{T}_{\gamma} = \bar{\mu} (1 + \bar{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 2 - \bar{\nu} U_{\gamma} \sqrt{1 + \bar{\nu}^2 U_{\gamma}^2 / 4}). \quad (28)$$

9.6.3 Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за напрацювання t обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t) = \Phi \left(\frac{\tilde{\mu} - t}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} t}} \right); \quad (29)$$

$$\underline{P}(t) = \Phi \left(\frac{\underline{\mu} - t}{\underline{\nu} \sqrt{\underline{\mu} t}} \right); \quad (30)$$

$$\bar{P}(t) = \Phi \left(\frac{\bar{\mu} - t}{\bar{\nu} \sqrt{\bar{\mu} t}} \right). \quad (31)$$

9.6.4 Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі напрацювання $(t, t + t_{зад})$ обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t, t_{зад}) = \frac{\Phi \left(\frac{\tilde{\mu} - t - t_{зад}}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} (t + t_{зад})}} \right)}{\Phi \left(\frac{\tilde{\mu} - t}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} t}} \right)}; \quad (32)$$

$$\underline{P}(t, t_{3a0}) = \frac{\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - t - t_{3a0}}{\underline{v} \sqrt{\underline{\mu}(t + t_{3a0})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - t}{\underline{v} \sqrt{\underline{\mu}t}}\right)}; \quad (33)$$

$$\bar{P}(t, t_{3a0}) = \frac{\Phi\left(\frac{\bar{\mu} - t - t_{3a0}}{\underline{v} \sqrt{\bar{\mu}(t + t_{3a0})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\bar{\mu} - t}{\underline{v} \sqrt{\bar{\mu}t}}\right)}. \quad (34)$$

10 ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОЇ ПОХИБКИ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

10.1 Граничну відносну помилку при оцінці середнього напрацювання до відмови (граничного стану) за результатами випробувань (експлуатації) обчислюють за формулою:

$$\xi = \max \left\{ \left(\frac{\tilde{T}_{cp} - T_{cp}}{\tilde{T}_{cp}} \right); \left(\frac{\bar{T}_{cp} - \tilde{T}_{cp}}{\tilde{T}_{cp}} \right) \right\}. \quad (35)$$

10.2 Граничну відносну помилку при оцінці гамма-процентного напрацювання до відмови (граничного стану) за результатами випробувань (експлуатації) обчислюють за формулою:

$$\xi = \max \left\{ \left(\frac{\tilde{T}_{\gamma} - T_{\gamma}}{\tilde{T}_{\gamma}} \right); \left(\frac{\bar{T}_{\gamma} - \tilde{T}_{\gamma}}{\tilde{T}_{\gamma}} \right) \right\}. \quad (36)$$

10.3 Граничну відносну помилку ξ оцінки вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за результатами обчислення точкових і граничних оцінок ВБР визначають по формулі:

$$\xi = \max \left\{ \frac{\tilde{F} - \underline{F}}{\tilde{F}}; \frac{\bar{F} - \tilde{F}}{\tilde{F}} \right\}. \quad (37)$$

де $\tilde{F} = 1 - \tilde{P}(t_s)$; $\underline{F} = 1 - \underline{P}(t_s)$; $\bar{F} = 1 - \bar{P}(t_s)$.

10.4 Вичисливши спостережувані (експериментальні) оцінки відносної погрішності ξ для прийнятої довірчої вірогідності q далі порівнюють їх з

рекомендованими значеннями згідно відповідного стандарту і роблять укладення про достовірність отриманих оцінок.

11 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИ ОДНОРАЗОВОМУ ЦЕНЗУРОВАННІ І НАЯВНОСТІ ВІДМОВ (МАЛА ВИБІРКА)

11.1 На мал. 1 і мал. 2 представлені діаграми реалізацій при планах випробувань [NUr] і [NUT].

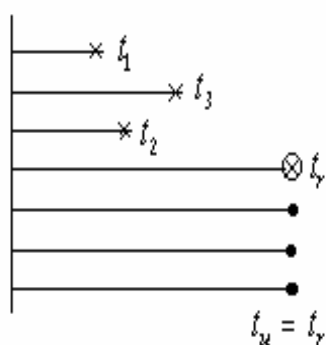


Рис.1 План [NUr]

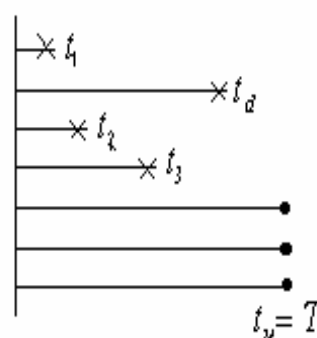


Рис.2 План [NUT]

На діаграмах прийняті наступні графічні позначення:

----x - повна реалізація (відмова);

----• - неповна реалізація (призупинення);

----⊗ - повна реалізація і призупинення випробувань (спостережень), якщо випробування (спостереження) ведуться до фіксованого числа відмов r .

11.2 При малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$) значення параметра форми $(\check{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$ DM - розподілу визначають згідно з 7.5.

11.3 Визначення параметра масштабу μ DM - розподілу.

11.3.1 За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань повністю (граничного стану) : t_1, t_2, \dots, t_r (t_1, t_2, \dots, t_d).

ДСТУ

11.3.2 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:

$$F_j = j/N.$$

11.3.3 По таблиці Г.1 визначають U_{F_j} - аргумент функції нормованого нормального розподілу (квантиль рівня F_j).

11.3.4 Обчислюють точкову оцінку параметра $\tilde{\mu}$ використовуючи формулу (13). Якщо співпадаючих напрацювань немає ($k_j=1$), те вираження для точкової оцінки $\tilde{\mu}$ має вигляд:

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{m} \left[\sum_j^m t_j \left(1 + \frac{\tilde{v}^2 U_{F_j}^2}{2} - \tilde{v} U_{F_j} \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}^2 U_{F_j}^2}{4}} \right) \right]. \quad (38)$$

11.4 Довірчі межі параметра масштабу ($\underline{\mu}, \bar{\mu}$) обчислюють по формулах (19) (21).

11.5 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з 9.6.

11.6 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

12 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИ БАГАТОРАЗОВОМУ ЦЕНЗУРИРОВАННІ І НАЯВНОСТІ ВІДМОВ (МАЛА ВИБІРКА)

12.1 На рис.3 і рис.4 представлені діаграми реалізацій при планах випробувань [NRr] і [NRT].

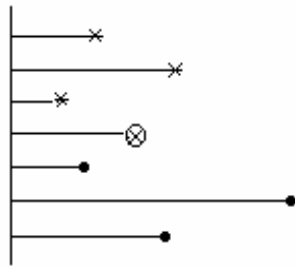


Рис.3 План [NRr]

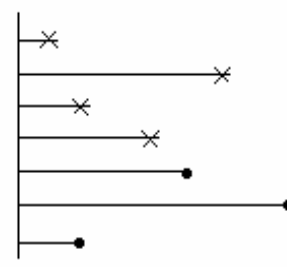


Рис.4 План [NRT]

ДСТУ

12.2 При малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$) значення параметра форми $(\tilde{v}, \underline{v}, \bar{v})$ DM - розподілу визначають згідно з 7.5.

12.3 Визначення параметра масштабу μ DM -розподілу.

12.3.1 За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань до відмови і до цензуруванню: $(t_1, t_2, \dots, t_r, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$.

12.3.2 Визначають значення емпіричної функції розподілу в кожен момент t_j (τ_j) варіаційного ряду по формулі:

$$F_j = F_{j-1} + (1 - F_{j-1}) \frac{r_j}{\left[N - \sum_{i=1}^{j-1} (r_i + n_i) \right]}, \quad (39)$$

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

12.3.3 Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу $\tilde{\mu}$ по формулі (13).

12.3.4 Довірчі межі параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$ обчислюють по формулах (19), (21), в яких $m = r$ чи $m = d$.

12.3.5 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з 9.6.

12.3.6 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

13 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИ ОДНОРАЗОВОМУ ЦЕНЗУРИРОВАННІ ТА ВІДСУТНОСТІ ВІДМОВ (МАЛА ВИБІРКА)

13.1 У разі, коли на момент контролю (цензуруванню) t_u група ідентичних зразків ($N \geq 4$) не мала відмов, параметр форми визначають відповідно до 7.5.

13.2 Нижню межу вірогідності відсутності відмови за інтервал випробувань (експлуатації) t_u якщо на випробуванні (експлуатації) знаходилося N зразків і відмова не зафіксована, обчислюють за формулою:

$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2} \right)^{1/N}, \quad (40)$$

Нижче приведена таблиця 2 значень $\underline{P}(t_u)$ вчислених для деяких значень N і q .

Таблиця 2 - 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

13.3 Параметр масштабу μ DM - розподілу для даної схеми випробувань (експлуатації) визначають, вирішуючи рівняння:

$$\underline{P}(t_u) = \Phi \left(\frac{\mu - t_u}{v \sqrt{\mu t_u}} \right). \quad (41)$$

З останнього рівняння (41) отримують розв'язок (оцінку нижньої довірчої межі параметра μ) у наступному виді:

$$\underline{\mu} = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}), \quad (42)$$

де $K_1(\underline{P}, \bar{v}) = 1 + \frac{\bar{v}^2 U_P^2}{2} + \bar{v} U_P \sqrt{1 + \frac{\bar{v}^2 U_P^2}{4}}$ - поправковий коефіцієнт, що враховує емпіричну вірогідність відмови (відсутності відмови); U_P - аргумент функції нормального розподілу (квантиль рівня \underline{P}) визначають з відповідних таблиць довідкової літератури або з таблиці Г.1.

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

$$\tilde{\mu} = \underline{\mu} \cdot K_2(q, \tilde{v}) = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}) \cdot K_2(q, \tilde{v}), \quad (43)$$

де $K_2(q, \tilde{v}) = 1 + \frac{\tilde{v}^2 U_q^2}{2} + \tilde{v} U_q \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}^2 U_q^2}{4}}$ - поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу і довірчу вірогідність оцінки параметра.

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

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} K_2(q, \tilde{v}). \quad (44)$$

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

13.6 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з 9.6.

13.7 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

14 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ ВІДМОВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

14.1 Якщо процедура випробувань (спостережень) при експлуатації здійснюється по планах [NMT] чи [NM_r], те обчислюють сумарне

ДСТУ

напрацювання усіх об'єктів по формулі $S = \sum_{i=1}^N T_i$ де T_i - загальне напрацювання i -го зразка за час випробувань (спостережень).

14.2 При малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$) значення параметра форми $(\check{v}, \underline{v}, \bar{v})$ DM - розподілу напрацювання на відмову визначають згідно з 7.5.

14.3 Обчислюють оцінку параметра масштабу DM - розподіли напрацювання на відмову відповідно до 9.4.

14.4 Довірчі межі параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$ обчислюють по формулах (19), (21), в яких $m = r$ чи $m = d$.

14.5 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з 9.5.

14.6 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ І (АБО) ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРИ DN -РОЗПОДІЛІ

А.1 Основні характеристики DN -розподілу

Функція розподілу (модель відмов) :

$$F(t) = DN(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \ell^{2\nu-2} \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (\text{A.1})$$

Вірогідність безвідмовної роботи (модель надійності) :

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) - \ell^{2\nu-2} \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (\text{A.2})$$

Середнє напрацювання до відмови (середній ресурс) :

$$T_{cp} = \mu. \quad (\text{A.3})$$

Гамма-процентна напрацювання до відмови (гамма-процентний ресурс)

:

$$T_{\gamma} = \mu x(1 - \gamma, \nu), \quad (\text{A.4})$$

де значення $x(1 - \gamma, \nu)$ рівне відносному напрацюванню $x = \frac{t}{\mu}$ визначають з

таблиць функції DN - розподілу по значеннях $F = 1 - \gamma$ і ν чи розв'язуючи рівняння

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

Вірогідність безвідмовної роботи в заданому інтервалі $(t, t + t_{зад})$:

$$P(t, t_{зад}) = \frac{\Phi\left(\frac{\mu - t - t_{зад}}{\nu\sqrt{\mu(t + t_{зад})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu + t + t_{зад}}{\nu\sqrt{\mu(t + t_{зад})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu + t}{\nu\sqrt{\mu t}}\right)}, \quad (\text{A.5})$$

де t - напрацювання з початку експлуатації для невідновних об'єктів або напрацювання після чергового відновлення для відновлюваних об'єктів; $t_{зад}$ - заданий інтервал безвідмовного напрацювання.

А.2 Планування випробувань на надійність

Планування випробувань на надійність здійснюють згідно з 7.1 - 7.4.

А.3 Очікуване значення коефіцієнта варіації

Очікуване значення коефіцієнта варіації визначають згідно з рекомендаціями Додатка В або ДСТУ 3433.

Якщо встановлені переважаючі процеси деградації і їх доля (відсотки) у формуванні відмов об'єкту, то очікуване середнє значення коефіцієнта варіації визначають згідно з рекомендаціями 7.5.

А.4 Обсяг випробувань

Об'єм випробувань визначають згідно з 8.1.

А.5 Оцінка показників надійності за результатами випробувань в загальному випадку

А.5.1 Обчислення точкових оцінок параметрів DN - розподілу при достатній статистиці ($N > 6$)

А.5.1.1 При плані випробувань [NUN] максимально-правдоподібні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = \tilde{s}; \quad (\text{A.6})$$

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\tilde{s}/G-1}, \quad (\text{A.7})$$

де $\tilde{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$; $G = N \left(\sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right)^{-1}$.

Моментні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = \tilde{s}; \quad (\text{A.8})$$

$$\tilde{\nu} = \frac{\sqrt{D}}{\tilde{s}}, \quad (\text{A.9})$$

де $D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \tilde{s})^2$.

А.5.1.2 При планах випробувань [NRr] чи [NRT] (багаторазово цензурована вибірка) максимально-правдоподібні оцінки параметрів DN - розподілу обчислюють, вирішуючи систему рівнянь :

$$\begin{cases} v^2 + \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{v^2 DN(\tau_j; \mu, v) + \frac{\mu'_{1j}}{\mu} - \mu \mu'_{-1j}}{1 - DN(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0; \\ 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{(2 + v^2) DN(\tau_j; \mu, v) - \mu \mu'_{-1j} - \frac{\mu'_{1j}}{\mu}}{1 - DN(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0, \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

де усі позначення $m'_1, m'_{-1}, \mu'_{1j}, \mu'_{-1j}$ відповідно до 9.3.1.2.

А.5.1.3 При планах випробувань [NUr] чи [NUT], тобто при одноразовому усіканні вибірки, максимально правдоподібні оцінки параметрів DN -розподілу обчислюють, вирішуючи систему рівнянь :

$$\begin{cases} v^2 + \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1-DN(t_r; \mu, v)]} \left[v^2 DN(t_r; \mu, v) + \frac{\mu'_1}{\mu} - \mu \mu'_{-1} \right] = 0; \\ 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1-DN(t_r; \mu, v)]} \left[(2+v^2) DN(t_r; \mu, v) - \mu \mu'_{-1} - \frac{\mu'_1}{\mu} \right] = 0, \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

де m'_1, m'_{-1}, μ'_{1j} - колишні позначення; $m = r$ - число відмов до моменту усікання за час випробувань (спостережень) за планом [NUT] чи $m = d$ - число відмов при плані випробувань (спостережень) [NUr] (при цьому $t_r = t_d$);

$$\mu'_{-1} = \int_0^{t_r} \frac{1}{t} f_N(t) dt; \quad \mu'_1 = \int_0^{t_r} t f_N(t) dt .$$

А.5.2 При одиничних відмовах ($r \leq 6$) параметр форми v DN -розподілу визначають згідно з А.3, а точкову оцінку параметра масштабу μ обчислюють за формулою (метод квантилів) :

$$\tilde{\mu} = \frac{\sum_{j=1}^w k_j t_j [x(j/N; \tilde{v})]^{-1}}{\sum_{j=1}^w k_j}, \quad (\text{A.12})$$

де k_j - число співпадаючих напрацювань на j -му інтервалі;

w - число прийнятих інтервалів ($w = r + n$).

А.5.3 Обчислення довірчих меж параметрів DN -розподілу

А.5.3.1 При достатній статистиці ($N > 6$) і плані випробувань [NUN] нижні довірчі межі параметрів рівня q обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} x \left(1 - q; \frac{\tilde{v}}{\sqrt{N}} \right); \quad (\text{A.13})$$

ДСТУ

$$\underline{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2}{4N} - \frac{U_q}{4N} \sqrt{[8N + (1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2](1+2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (\text{A.14})$$

Верхні довірчі межі параметрів DN - розподілу обчислюють по формулах:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} x \left(q; \frac{\tilde{\nu}}{\sqrt{N}} \right); \quad (\text{A.15})$$

$$\bar{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2}{4N} + \frac{U_q}{4N} \sqrt{[8N + (1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2](1+2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (\text{A.16})$$

А.5.3.2 При достатній статистиці ($m > 6$) і планах випробувань [NUr] чи [NUT] нижні довірчі межі параметрів обчислюють по формулах:

$$\underline{\mu} = \tilde{\mu} x \left(1-q; \frac{\tilde{\nu}}{\sqrt{m}} \right); \quad (\text{A.17})$$

$$\underline{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2}{4m} - \frac{U_q}{4m} \sqrt{[8m + (1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2](1+2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (\text{A.18})$$

Верхні довірчі межі параметрів DN - розподілу обчислюють по формулах:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} x \left(q; \frac{\tilde{\nu}}{\sqrt{m}} \right); \quad (\text{A.19})$$

$$\bar{\nu} = \tilde{\nu} \left\{ 1 + \frac{(1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2}{4m} + \frac{U_q}{4m} \sqrt{[8m + (1+2\tilde{\nu}^2)U_q^2](1+2\tilde{\nu}^2)} \right\}. \quad (\text{A.20})$$

А.5.3.3 При одиничних відмовах ($r \leq 6$) граничні оцінки параметра форми ν DN - розподілу визначають відповідно до рекомендацій А.3, а довірчі межі параметра масштабу μ обчислюють по формулах (А.13), (А.15) або (А.17) (А.19).

А.5.4 Обчислення точкових оцінок і довірчих меж визначуваного показника надійності

А.5.4.1 Точкову оцінку і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu}; \quad (\text{A.21})$$

$$\underline{T}_{cp} = \underline{\mu} ; \quad (\text{A.22})$$

$$\overline{T}_{cp} = \overline{\mu} . \quad (\text{A.23})$$

А.5.4.2 Точкову оцінку і довірчі межі гамма-процентної напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\tilde{T}_{\gamma} = \tilde{\mu} \cdot x(1 - \gamma; \tilde{\nu}) ; \quad (\text{A.24})$$

$$\underline{T}_{\gamma} = \underline{\mu} \cdot x(1 - \gamma; \underline{\nu}) ; \quad (\text{A.25})$$

$$\overline{T}_{\gamma} = \overline{\mu} \cdot x(1 - \gamma; \underline{\nu}) . \quad (\text{A.26})$$

А.5.4.3 Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за напрацювання t обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t) = \Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right)\Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right); \quad (\text{A.27})$$

$$\underline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\underline{\mu} - t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right)\Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right); \quad (\text{A.28})$$

$$\overline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\overline{\mu} - t}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right)\Phi\left(-\frac{\overline{\mu} + t}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right). \quad (\text{A.29})$$

А.5.4.4 Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі $(t, t + t_{3ad})$ обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t, t_{3ad}) = \frac{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - t - t_{3ad}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{3ad})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + t + t_{3ad}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{3ad})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu} - t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu} + t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right)}; \quad (\text{A.30})$$

$$\underline{P}(t, t_{3ad}) = \frac{\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - t - t_{3ad}}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}(t+t_{3ad})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + t + t_{3ad}}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}(t+t_{3ad})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\underline{\mu} - t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\underline{\mu} + t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right)}; \quad (\text{A.31})$$

$$\overline{P}(t, t_{3ad}) = \frac{\Phi\left(\frac{\overline{\mu} - t - t_{3ad}}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}(t+t_{3ad})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\overline{\mu} + t + t_{3ad}}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}(t+t_{3ad})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\overline{\mu} - t}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\overline{\mu} + t}{\underline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right)}. \quad (\text{A.32})$$

А.6 Оцінка показників надійності при одноразовому цензуруванні і наявності відмов (мала вибірка)

А.6.1 Визначення значення параметра форми $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$ DN- розподілу при малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$)

При малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$) значення параметра форми $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$ DN- розподілу визначають згідно з А. 3.

А.6.2 Визначення параметра масштабу μ DN- розподілу

А.6.2.1 За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань повністю (граничного стану) : t_1, t_2, \dots, t_r (t_1, t_2, \dots, t_d).

А.6.2.2 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:

$$F_j = j / N.$$

А.6.2.3 По таблиці Г.1 визначають U_{F_j} - аргумент функції нормованого нормального розподілу (квантиль рівня F_j).

А.6.2.4 Обчислюють точкову оцінку параметра $\tilde{\mu}$ використовуючи формулу (А.12). Якщо співпадаючих напрацювань немає ($k_j=1$), те вираження для точкової оцінки $\tilde{\mu}$ має вигляд:

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j \left[x \left(\frac{j}{N}; \tilde{\nu} \right) \right]^{-1}. \quad (\text{A.33})$$

А.6.2.5 Довірчих меж параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$ обчислюють по формулах (А.17), (А.19), в яких $m = r$ чи $m = d$.

А.6.2.6 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з А.5.4.

А.6.2.7 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

А.7 Оцінка показників надійності при багатократному цензуруванні і наявності відмов (мала вибірка)

А.7.1 При малому числі відмов ($r \leq 6, d \leq 6$) значення параметра форми $(\tilde{\nu}, \underline{\nu}, \bar{\nu})$ DN- розподілу визначають згідно А. 3.

А.7.2 Визначення параметра масштабу μ DN- розподілу

А.7.2.1 За результатами спостережень формують варіаційний числовий ряд по неубуванню сумарних напрацювань повністю і до цензурирования: $(t_1, t_2, \dots, t_r, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$.

А.7.2.2 Визначають значення емпіричної функції розподілу в кожен момент t_j (τ_j) варіаційного ряду по формулі:

$$F_j = F_{j-1} + (1 - F_{j-1}) \frac{r_j}{\left[N - \sum_{i=1}^{j-1} (r_i + n_i) \right]}, \quad (\text{A.34})$$

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

А.7.2.3 Обчислюють точкову оцінку параметра масштабу $\tilde{\mu}$ по формулі (А.12) або (А.33), якщо $k_j = 1$.

А.7.2.4 Довірчих меж параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$ обчислюють по формулах (А.17), (А.19), в яких $m = r$ чи $m = d$.

А.7.2.5 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно з А.5.4.

А.7.2.7 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10 справжнього стандарту.

А.8 Оцінка показників надійності за відсутності відмов (мала вибірка)

А.8.1 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 В.

А.8.2 Визначають нижню межу вірогідності відсутності відмови за інтервал експлуатації (спостереження) t_u з таблиці 2 або обчислюють за формулою (40).

А.8.3 Обчислюють нижню довірчу межу параметра масштабу μ DN -розподілу за формулою:

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x[1 - \underline{P}(t_u); \bar{v}]} = t_u \cdot K_1^*(\underline{P}, \bar{v}), \quad (\text{A.35})$$

ДСТУ

де $K_1^*(P, \bar{v})$ - поправковий коефіцієнт, що враховує емпіричну вірогідність відсутності відмови, визначають з таблиці Г.4; $x[\cdot]$ визначають згідно з рекомендаціями А.1.

А.8.4 Використовуючи оцінку $\underline{\mu}$ що відповідає довірчій вірогідності q отримують вибірккову середню оцінку параметра $\tilde{\mu}$:

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x(1-q; \tilde{v})} = t_u \cdot K_1^*(P, \bar{v}) \cdot K_2^*(q, \tilde{v}), \quad (\text{A.36})$$

де $K_2^*(q, \tilde{v})$ - поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу і довірчу вірогідність оцінки параметра визначають з таблиці Г.5.

А.8.5 Оцінку верхньої довірчої межі параметра масштабу $\bar{\mu}$ обчислюють за формулою:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} \cdot x(q; \tilde{v}) = \tilde{\mu} \bar{K}_2^*(q, \tilde{v}). \quad (\text{A.37})$$

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

А.8.6 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно А.5.4.

А.8.7 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10 справжнього стандарту.

А.9 Оцінка показників надійності при спостереженні відмов в процесі експлуатації відновлюваних об'єктів.

А.9.1 Якщо процедура випробувань (спостережень) при експлуатації здійснюється по планах [NMT] чи [NM r], те обчислюють сумарне напрацювання усіх об'єктів по формулі $S = \sum_{i=1}^N T_i$ де T_i - загальне напрацювання i -го зразка за час випробувань (спостережень).

А.9.2 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 7.5.

А.9.3 Обчислюють оцінку параметра масштабу DN – розподіли напрацювання на відмову по формулі:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m}, \quad (\text{A.38})$$

де $m = r$ чи $m = d$.

А.9.4 Довірчих межі параметра масштабу $(\underline{\mu}, \bar{\mu})$ обчислюють по формулах (А.35) (А.37).

А.9.5 Обчислюють точкові оцінки і довірчі межі відповідних показників надійності згідно А.5.4.

А.9.6 Обчислюють граничну відносну помилку ξ відповідного показника надійності згідно з розділом 10.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТАНДАРТУ

Б.1 Математична модель відмов електронних елементів (дифузійний немонотонний розподіл)

Згідно імовірісно-фізичної теорії надійності процес деградації виробів електронної техніки разом з монотонними реалізаціями (механічне руйнування) внаслідок електричних явищ має і немонотонні реалізації, тому в загальному випадку прийнято розглядати деградацію цих виробів як процес з немонотонними реалізаціями (см рис. Б.1).

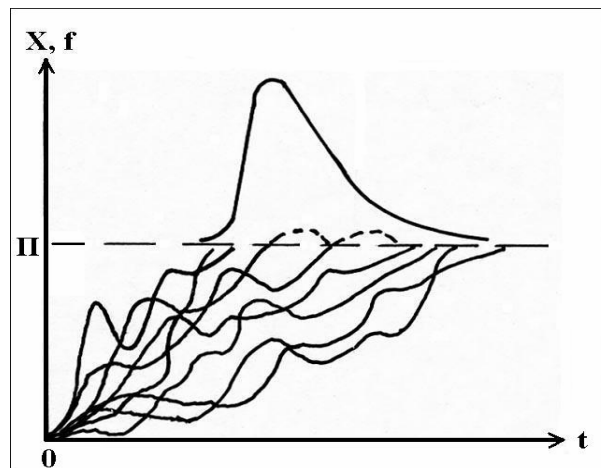


Рисунок Б.1 - Модель випадкового процесу деградації (марківський немонотонний процес) і схема формування розподілу напрацювання до відмови (DN- розподіл)

Для того, щоб визначити вираження для закону розподілу часу до першої відмови, першого досягнення граничного рівня даним процесом (рисунок Б.1), необхідно конкретизувати функції $A(t)$ і $B(t)$. Розглядатимемо процес деградації виробів (рисунок Б.1) для сукупності однотипних виробів як однорідний, тобто з постійною середньою швидкістю і постійним середнім квадратичним відхиленням швидкості (чи постійним коефіцієнтом варіації швидкості). У такому разі кінетичне рівняння процесу (рисунок Б.1) можна записати у виді:

$$dx(t) = a dt + b d\eta(t), \quad (\text{Б.1})$$

де a - коефіцієнт зносу (середня швидкість зміни визначального параметра);
 b - коефіцієнт дифузії (b^2 - середня швидкість зміни дисперсії визначального параметра).

Якщо марківський процес дифузійного типу визначається наведеним вище рівнянням, то дифузія умовної перехідної щільності $\omega(t_0, x_0; t, x)$ цього процесу описується рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова наступного виду :

$$\frac{\partial \omega(t_0, x_0; t, x)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(t_0, x_0; t, x)}{\partial x} - \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 \omega(t_0, x_0; t, x)}{\partial x^2} = 0. \quad (\text{Б.2})$$

Як відомо, щільність розподілу часу досягнення межі нормованим процесом (щільність розподілу часу повністю), що вивчається, має наступний зв'язок з умовною щільністю переходу процесу з одного стану в інший:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \omega(t_0, x_0; t, x)}{\partial t} dx . \quad (\text{Б.3})$$

Щоб визначити щільність вірогідності розподілу часу повністю $f(t)$ необхідно отримати вираження $\omega(t_0, x_0; t, x)$ розв'язавши рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова, потім знайти приватну похідну за часом від функції $\omega(t_0, x_0; t, x)$ і отримане вираження проінтегрувати по параметру x . Така схема формалізації так званих дифузійних розподілів. Їх назва "дифузійний" обумовлено тим, що вираження для закону розподілу витікає з розв'язку рівняння дифузії вірогідності.

Переходимо до розв'язування рівняння дифузії вірогідності. Це рівняння є параболічним диференціальним рівнянням в приватних похідних. Для розв'язування такого типу рівнянь необхідно встановити крайові умови, які визначаються із загальних фізичних міркувань про процес і шукану функцію.

Початкові умови в найзагальнішому випадку, виходячи з шуканої функції $\omega(t_0, x_0; t, x)$ (щільність вірогідності) можуть бути задані, наприклад, у виді

$$\omega(t_0, x_0; t, x) \Big|_{t=t_0} = \omega_0(x_0), \quad (\text{Б.4})$$

де $\omega_0(x_0)$ - деякий довільний розподіл досліджуваного параметра в початковий момент.

Якщо початкове значення параметра задане (наприклад, без втрати спільності можна покласти $x_0 = 0, t_0 = 0$), тоді $\omega_0(x_0)$ вироджується в δ -функцію:

$$\omega(t, x) \Big|_{t=0} = \delta(x). \quad (\text{Б.5})$$

Що стосується визначення граничних умов, то тут необхідно оцінити характер реалізацій процесу $x(t)$. Нагадаємо, що маються на увазі реалізації - зміна визначальних параметрів невідновних об'єктів. Перше досягнення

ДСТУ

реалізацією межі заданої області (у нашому випадку параметр змінюється від нуля до одиниці) відповідає відмові об'єкту. За характером зміни реалізації необхідно визначити, чи моделює відмову перше досягнення реалізацією межі заданої області і чи може реалізація вплинути на процес, що вивчається $x(t)$ і відповідно на шукану функцію $\omega(t,x)$ надалі, після першого досягнення межі.

Якщо реалізації мають немонотонний характер, то після першого досягнення межі заданої області (фізично це відповідає відмові і зняттю виробу із спостереження) немонотонна реалізація може знову повернутися в задану область і брати участь в спостережуваному процесі (деякі подібні реалізації показані штриховими лініями на рисунку Б.1).

Для того, щоб перше досягнення межі немонотонною реалізацією моделювало відмову і подальша реалізація не брала участь в спостережуваному процесі і не впливала на $\omega(t,x)$, необхідно на межі заданої області поставити граничну умову типу "поглинальний екран". У такому разі будь-яка реалізація, уперше досягнувши його, назавжди залишається на межі, поза заданою областю.

Оскільки вище було встановлено, що реалізації процесу деградації виробів електронної техніки можуть мати немонотонний характер, в якості граничних умов при розв'язуванні рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова приймаються умови:

$$\omega(t,x)|_{x=-\infty} = 0; \quad (\text{Б.6})$$

$$\omega(t,x)|_{x=1} = 0. \quad (\text{Б.7})$$

Перша гранична умова чисто формальна. Оскільки процес (визначальний параметр виробів), що вивчається, не може набувати негативних значень, встановлена ліва межа є недосяжною (природною) і ніяк не впливає на процес в заданій області. Прийняття формальної умови потрібне для розв'язування рівняння. Гранична умова витікає з вище приведених міркувань і відповідає поглинальному екрану в точці $x = 1$.

Розв'язання рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова для прийнятих крайових умов записується в наступному виді:

$$\omega(t,x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right] \right\}. \quad (\text{Б.8})$$

Вичислимо похідну

$$\frac{\partial \omega(t,x)}{\partial t} = \frac{x^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right] - \frac{(x-2)^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right]. \quad (\text{Б.9})$$

Підставивши останнє вираження у формулу для щільності розподілу, проінтегруємо і отримаємо вираження для щільності розподілу часу до першої відмови:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \left\{ \frac{x^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right] - \frac{(x-2)^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right] \right\} dx \quad (\text{Б.10})$$

Представимо останній інтеграл у вигляді суми інтегралів :

$$f(t) = J_1 + J_2;$$

$$J_1 = - \int_{-\infty}^1 \left\{ \frac{x^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right] \right\} dx; \quad (\text{Б.11})$$

$$J_2 = \int_{-\infty}^1 \left\{ \frac{(x-2)^2 - a^2 t^2 - b^2 t}{2b^3 t^2 \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right] \right\} dx. \quad (\text{Б.12})$$

Для визначення першого інтеграла робимо підстановку $y = \frac{x-at}{b\sqrt{2t}}$, тоді

$$dx = b\sqrt{2t} dy. \quad \text{При } x=1 \rightarrow y = \frac{1-at}{b\sqrt{2t}}.$$

Виконуємо підстановку і деякі перетворення в першому інтегралі:

$$\begin{aligned} J_1 &= - \int_{-\infty}^y \left\{ \frac{2by^2 + 2ay\sqrt{2} - b}{2bt\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) \right\} dy = \\ &= - \frac{1}{t\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^y y^2 \exp(-y^2) dy - \frac{a\sqrt{2}}{b\sqrt{\pi t}} \int_{-\infty}^y y \exp(-y^2) dy + \frac{1}{2t\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^y \exp(-y^2) dy = \\ &= \frac{1}{t\sqrt{\pi}} \left[\frac{y}{2} \exp(-y^2) - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^y \exp(-y^2) dy \right] + \frac{a}{b\sqrt{2\pi t}} \exp(-y^2) + \frac{1}{2t\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^y \exp(-y^2) dy = \end{aligned}$$

ДСТУ

$$= \left(\frac{y}{2t\sqrt{\pi}} + \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \right) \exp(-y^2).$$

Зробивши зворотню заміну змінних, отримуємо

$$J_1 = \frac{1+at}{2bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}\right]. \quad (\text{Б.13})$$

Для обчислення другого інтеграла робимо підстановку $z = \frac{x-at-2}{b\sqrt{2t}}$, тоді

$$dx = b\sqrt{2t} dz. \text{ При } x = -\infty \rightarrow z = -\infty, \text{ а при } x = 1 \rightarrow z = -\frac{1+at}{b\sqrt{2t}}$$

Виконавши підстановку і зробивши деякі перетворення маємо

$$J_2 = \int_{-\infty}^{-\frac{1+at}{b\sqrt{2t}}} \frac{(2bz^2 + 2az\sqrt{2t} - b)}{2bt\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{2a}{b^2} - z^2\right) dz = -\left(\frac{z}{2t\sqrt{\pi}} + \frac{a}{d\sqrt{2\pi t}}\right) \exp\left(\frac{2a}{b^2} - z^2\right). \quad (\text{Б.14})$$

Зробивши зворотню заміну змінних отримуємо

$$J_2 = \frac{1-at}{2bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}\right]. \quad (\text{Б.15})$$

Підсумовуючи знайдені інтеграли, визначаємо вираження для щільності розподілу часу повністю виробів електронної техніки :

$$f(t) = \frac{1}{bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}\right]. \quad (\text{Б.16})$$

Для однорідного процесу деградації дифузійного типу коефіцієнт дифузії має простий зв'язок із зазвичай використовуваними характеристиками процесу - середнім квадратичним відхиленням швидкості процесу (σ_a) і коефіцієнтом варіації процесу (ν)

$$b = \frac{\sigma_a}{\sqrt{a}} = \nu\sqrt{a}. \quad (\text{Б.17})$$

Тоді можна описати вираження для закону розподілу часу до відмови в наступному виді:

$$f(t) = \frac{1}{\nu t\sqrt{2\pi at}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2\nu^2 at}\right]. \quad (\text{Б.18})$$

Прийнятий отриманий дифузійний (Diffusive) розподіл, що відповідає немонотонному (Nonmonotonic) марківському процесу, по перших буквах

визначальних слів називати дифузійним немонотонним розподілом (DN-розподілом). Отриманій щільності відповідає функція розподілу

$$F(t) = \Phi\left(\frac{at-1}{v\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{at+1}{v\sqrt{at}}\right), \quad (\text{Б.19})$$

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

Б.2 Математична модель відмов механічних елементів (дифузійний монотонний розподіл)

Для компонентів технічних систем, що містять електромеханічні і механічні елементи (контакти реле і роз'ємів, ковзаючі електричні контакти, підшипники, зубчасті передачі та ін.), лімітуючими, як правило, працездатність компонентів являються механічні процеси деградації (пластичні деформації, розвиток втомних тріщин, втомне викришування, механічний знос і тому подібне).

Процес деградації механічних об'єктів внаслідок необоротності процесів руйнування (механічного зношування, втоми, втомного викришування) прийнято розглядати як процес з монотонними реалізаціями. Прийнято апроксимувати процес деградації таких елементів марківським процесом дифузійного типу з монотонними реалізаціями.

Слід зауважити, що строге визначення дифузійних процесів не передбачає строго монотонних реалізацій. В той же час до марківського процесу дифузійного типу відносять безперервний процес гауса з незалежними приростами (саме такий процес накопичення ушкоджень спостерігається при механічному зносі або втомному руйнуванні). У такого процесу реалізації можуть мати монотонний характер. Ефективність використовуваного апарату марківських процесів досягши поставленої мети виправдовує незначні допущення і некоректності.

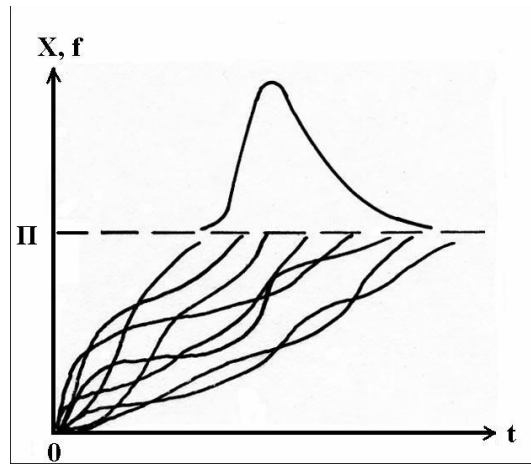


Рисунок Б.2 - Модель випадкового процесу деградації (марківський монотонний процес) і схема формування розподілу напрацювання до відмови (DM- розподіл)

Використовуючи продемонстровану в попередньому пункті схему формалізації, визначуваний закон розподілу часу повністю механічних елементів. Аналогічно попередньому випадку розглянемо процес деградації механічних елементів (сукупності ідентичних зразків) у вигляді однорідного процесу з постійною середньою швидкістю і постійним коефіцієнтом варіації швидкості (чи процесу), тобто в якості кінетичного рівняння процесу деградації приймаємо стохастичне диференціальне рівняння. Умовна перехідна щільність $\omega(t_0, x_0; t, x)$ процесу, як і раніше, є розв'язком рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова. Але на відміну від попереднього випадку граничні умови для безповоротного монотонного процесу при рішенні будуть іншими.

Якщо процес деградації має монотонні реалізації, то перший перетин кордону будь-якою реалізацією буде одночасно і останнім, тобто реалізація в подальшому вже більше ніколи і ніяк не впливатиме на спостережуваний процес. Це означає, що немає необхідності у встановленні яких або умов на межі заданої області. У зв'язку з останнім в якості граничних умов приймаються:

$$\omega(t, x) \Big|_{x=-\infty} = 0; \quad (\text{Б.20})$$

$$\omega(t, x) \Big|_{x=+\infty} = 0. \quad (\text{Б.21})$$

Приведені межі є недосяжними для процесу, що вивчається, ніяк не впливають на процес в заданій області. Це чисто формальні граничні умови, необхідні для розв'язування рівняння.

Розв'язок рівняння з цими умовами відоме в літературі як фундаментальний розв'язок рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова і записується у виді

$$\omega(t, x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t} \right] \right\}. \quad (\text{Б.20})$$

Помітимо, що отримана перехідна щільність є першим доданком умовної перехідної щільності немонотонного процесу. У такому разі, використовуючи результати попереднього пункту, зокрема, співвідношення, можна відразу записати вираження для щільності розподілу часу до першої відмови в наступному виді

$$f(t) = \frac{1+at}{2bt\sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t} \right]. \quad (\text{Б.22})$$

Використовуючи отримане співвідношення запишемо вираження закону розподілу до відмови механічних об'єктів у такому вигляді

$$f(t) = \frac{1+at}{2vt\sqrt{2\pi at}} \exp \left[-\frac{(1-at)^2}{2v^2 at} \right]. \quad (\text{Б.23})$$

Прийнятий дифузійний (*Diffusive*) розподіл, що відповідає монотонному (*Monotonic*) марківському процесу, називати *DM*-розподілом (дифузійним монотонним розподілом).

Представленій щільності відповідає функція розподілу :

$$F(t) = \Phi \left(\frac{at-1}{v\sqrt{at}} \right). \quad (\text{Б.24})$$

ДОДАТОК В
(обов'язковий)

РЕКОМЕНДАЦІЇ З ОЦІНКИ КОЕФІЦІЄНТА ВАРІАЦІЇ РОЗПОДІЛУ
НАРОБІТКУ ДО ВІДМОВИ (РЕСУРСУ)

На підставі результатів випробувань і експлуатації аналогів механічного, електромеханічного, тепломеханічного устаткування встановлено, що коефіцієнти варіації напруження 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, ГОСТ 27.005.

Значення коефіцієнтів варіації напруження до відмови (ресурсу) для типових об'єктів устаткування приведені нижче в таблиці В.1.

Таблиця В.1 – значення коефіцієнтів варіації напружень і видів процесів руйнувань для типових об'єктів 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

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

Якщо встановлені переважаючі процеси деградації і їх доля (відсотки) у формуванні відмов об'єкту, то очікуване середнє значення коефіцієнта варіації визначають згідно з рекомендаціями 7.5.

Значення коефіцієнтів варіації напрацювання до відмови (ресурсу) для типових об'єктів електронного і електротехнічного устаткування приведені нижче в таблиці В.2.

Для об'єктів, не включених в приведені таблиці, апіорі визначають коефіцієнт варіації напрацювання на підставі аналізу процесів деградації, що призводять до відмов, використовуючи 7.5 і значення коефіцієнтів варіації основних типових процесів деградації, приведені нижче в таблиці В.3.

Таблиця В.2 – значення коефіцієнтів варіації напрацювань і видів процесів руйнувань для типових об'єктів електронного і 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 В.3 - значення коефіцієнтів варіації основних процесів деградації (руйнування)

Вид руйнування (процес деградації)	Коефіцієнт варіації процесу руйнування
Втома:	
Малоциклова	0,15 – 0,40
Багатоциклова	0,40 – 1,00
Контактна	0,40 – 1,20
Знос	
Механо-хімічний	0,20 – 0,50
Абразивний	0,40 – 0,70
Старіння	0,40 – 1,00
Електричні процеси (електроліз, міграція зарядів, електродифузія)	0,70 – 1,50

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.

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 коефіцієнт навантаження, тим більше коефіцієнт варіації.

ДОДАТОК Г
(обов'язковий)

ТАБЛИЦІ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

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

P	Значення $K_1^*(P, \bar{\nu})$ 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 Г.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 Г.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 Г.7 - значення $x(F, \nu)$

F	Значення $x(F, \nu)$ для ν									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
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

ДОДАТОК Д (довідковий)

ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ НОРМАТИВНОГО МАТЕРІАЛУ

Приклад 1

Група арматури (зворотні клапани) у складі 15 зразків знаходиться в експлуатації впродовж 16 років. По двох виробках зафіксовані відмови і зроблені заміни. При цьому напрацювання виробів, що відмовили, склали

ДСТУ

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 130000 година. Вимагається визначити показники надійності (середній і гамма-процентний ресурс для $\gamma = 0,95$).

Представленій схемі спостережень відмов в процесі експлуатації відповідає методика розділу 12 цього нормативного документу.

Рішення.

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 справжнього стандарту і стандарту ДСТУ 3433 та ГОСТ 27.005, що очікуване значення коефіцієнта варіації ресурсу рівне $\tilde{\nu} = 0,5$.

За результатами приведених даних згідно з рекомендаціями 12.3.1 формують варіаційний ряд напрацювань повністю (t_1, t_2) і до цензурування (τ_1, τ_2, τ_3) :

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

Обчислюють значення емпіричної функції розподілу за формулою (39) і визначають значення квантилів U_{F_j} нормованого нормального розподілу для відповідної вірогідності F_j використовуючи таблицю Г.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 (13) обчислюють оцінку параметра масштабу μ при цьому $w = 5$; $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$; $k_5 = 13$; значення напрацювань $t_j(\tau_j)$ і U_{F_j} з попередньої таблиці:

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

Обчислюють середній ресурс досліджуваних виробів, використовуючи формулу (23) :

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu}(1 + \tilde{\nu}^2 / 2) = 208434 \left(1 + \frac{0,5^2}{2} \right) = 234488 \text{ година.}$$

Використовуючи формулу (26), обчислюють гамма-процентний ресурс:

$$\begin{aligned}
\tilde{T}_\gamma &= \tilde{\mu}(1 + \tilde{\nu}^2 U_\gamma^2 / 2 - \tilde{\nu} U_\gamma \sqrt{1 + \tilde{\nu}^2 U_\gamma^2 / 4}) = \\
&= 208434 \left(1 + \frac{0,5^2 \cdot 1,645^2}{2} - 0,5 \cdot 1,645 \sqrt{1 + \frac{0,5^2 \cdot 1,645^2}{4}} \right) = 93569 \text{ час}
\end{aligned}$$

Приклад 2

Під наглядом (експлуатація) знаходилося $N=6$ зразків (клапан замочний) впродовж напрацювання, рівного 5000 циклів (t_u), при цьому не було зафіксовано жодної відмови. Необхідно з довірчою вірогідністю $q=0,9$

ДСТУ

оцінити середнє напрацювання до відмови \tilde{T}_{cp} і нижню довірчу межу вірогідності безвідмовної роботи за $t_{зад} = 3000$ ц.

Схема випробувань (спостережень) відповідає методиці оцінки показників надійності, представленої в 13 розділі справжнього нормативного матеріалу.

Рішення.

1) 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 7.5 та ДСТУ 3433, 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 7.5 та ДСТУ 3433 набувають верхнього значення коефіцієнта варіації $\bar{v} = 0,7$.

2) Обчислюють нижню межу емпіричної вірогідності відсутності відмови за результатами випробувань (експлуатації) згідно з 13.2 по формулі (40):

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

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

4) Визначають поправковий коефіцієнт $K_1(\underline{P}, \bar{v})$ по значенням $\underline{P} = 0,607$ и $\bar{v} = 0,7$ из таблиці Г.2 або з рекомендаціями 13.3 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 Г.3 ($q = 0,9$; $\tilde{v} = 0,49$), чи по формулі (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 оцінки параметра масштабу DM - розподілу відповідно до рекомендацій 13.4:

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

$$\underline{\mu} = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{v}) = 5000 \cdot 1,21 = 6050 \text{ цикл.}$$

7) Обчислюють середнє напрацювання до відмови:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu} (1 + \tilde{v}^2 / 2) = 11227 \left(1 + \frac{0,49^2}{2} \right) = 12575 \text{ цикл.}$$

8) Обчислюють нижню довірчу межу вірогідності безвідмовної роботи за $t_{зад} = 3000$ цикл.:

$$\underline{P}(t_{зад}) = \Phi \left(\frac{\underline{\mu} - t_{зад}}{\bar{v} \sqrt{\underline{\mu} t_{зад}}} \right) = \Phi \left(\frac{6050 - 3000}{0,7 \sqrt{6050 \cdot 3000}} \right) = \Phi(2,256) = 0,984.$$

Приклад 3

Системи контролю (СК) у кількості 6 штук знаходилися в експлуатації впродовж 8 років. За цей час було виявлено в загальній чисельності 15 відмов в усіх системах контролю.

ДСТУ

СК працювали по графіку переходів, відповідно до якого перемикання відбувалося попарно, кожні 10 днів. У роботі постійно знаходилися 4 СК, а на 2-х СК проводилося технічне обслуговування. Вимагається визначити показники надійності (середнє напрацювання на відмову \tilde{T}_0 вірогідність безвідмовної роботи $P(t, t_{зад})$ за $t_{зад} = 240$ годин (період між перемиканнями СК, якщо СК пропрацювали шість місяців ($t = 4380$ час) після чергового контролю працездатності і ремонту).

Рішення.

Досліджуються відновлювані електротехнічні об'єкти, оцінка показників надійності робиться згідно з методикою розділу 14 і А.9.

1) Визначаємо середнє напрацювання на відмову СК :

а) Обчислюють загальне сумарне напрацювання 6 СК:

$$S = n (8 \cdot 365 \cdot 24) = 280320 \text{ ч}$$

де n - число СК, що знаходяться постійно в роботі ($n = 4$).

б) Визначають коефіцієнт варіації напрацювання на відмову СК згідно з 7.5 справжнього нормативного матеріалу. Оскільки причинами відмов є втома матеріалів внаслідок циклічного перегрівання, електричні процеси, старіння, тому відповідно до таблиць В.2-В.3 набувають середнього значення коефіцієнта варіації напрацювання на відмову рівним $\tilde{\nu} = 0,75$.

в) Обчислюють значення параметра масштабу μ DN -распределения напрацювання на відмову згідно з А.9.3: $\tilde{\mu} = \frac{S}{m} = 18688 \text{ ч}$

де m - число відмов за інтервал спостережень (прийняте $m = 15$).

г) Обчислюють середнє напрацювання на відмову: $\tilde{T}_0 = \tilde{\mu} = 18688 \text{ ч}$.

2) Визначають вірогідність безвідмовної роботи 4-х СК в заданому інтервалі $(t, t + t_{зад})$ (вірогідність відсутності відмови системи з 4-х СК) використовуючи формулу (А.5) :

$$\begin{aligned}
P(t, t_{3a0}) &= \frac{\Phi\left(\frac{\mu - t - t_{3a0}}{v \sqrt{\mu(t + t_{3a0})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu + t + t_{3a0}}{v \sqrt{\mu(t + t_{3a0})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu - t}{v \sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v \sqrt{\mu t}}\right)} = \\
&= \frac{\Phi\left(\frac{\mu_n - t - t_{3a0}}{v \sqrt{\mu_n(t + t_{3a0})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_n + t + t_{3a0}}{v \sqrt{\mu_n(t + t_{3a0})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu_n - t}{v \sqrt{\mu_n t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_n + t}{v \sqrt{\mu_n t}}\right)} = \\
&= \frac{\Phi\left(\frac{9344 - 4380 - 240}{0,75 \sqrt{9344(4380 + 240)}}\right) - \exp\left(\frac{2}{0,75^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{9344 + 4380 + 240}{0,75 \sqrt{9344(4380 + 240)}}\right)}{\Phi\left(\frac{9344 - 4380}{0,75 \sqrt{9344 \cdot 4380}}\right) - \exp\left(\frac{2}{0,75^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{9344 + 4380}{0,75 \sqrt{9344 \cdot 4380}}\right)} = \\
&= \frac{\Phi(0,959) - 35 \cdot \Phi(-2,834)}{\Phi(1,034) - 35 \cdot \Phi(-2,86)} = \frac{0,747}{0,771} = 0,9688,
\end{aligned}$$

де $v = \tilde{v}$; $\mu_n = \frac{\tilde{\mu}}{\sqrt{n}} = \frac{18688}{\sqrt{4}} = 9344$ час - параметр масштабу DN - розподілу

напрацювання на відмову системи з n об'єктів (в цьому завданні сукупність $n = 4$ СК розглядається як система послідовно сполучених в сенсі надійності об'єктів, що забезпечують працездатність і виконання певних функцій)

Код УКНД 21.020

Ключові слова: відмова, імовірно-фізичні моделі відмов, надійність, параметр масштабу, параметр форми, плани випробувань, показники надійності, цензурована вибірка, цензурування.

Керівник
ПІММС НАН України,
академік НАНУ

_____ А.О. Морозов

Керівник розробки,
д.т.н

_____ В.П. Стрельніков

Відповідальні виконавці

н.с.

_____ П.В. Стрельніков

головний математик

_____ М.М. Редковська

головний програміст

_____ Є.О. Лічман