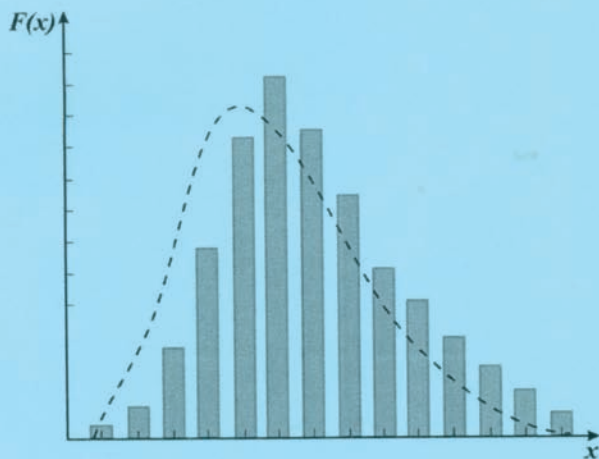


НАДІЙНІСТЬ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ ПРИЛАДІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Л. В. КРИЛИК, О. О. СЕЛЕЦЬКА

**НАДІЙНІСТЬ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ
ПРИЛАДІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК [621.382.004.15+006](075)

ББК 32.852-02ця73

K82

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 29.01.2015 р.).

Рецензенти:

О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Т. Б. Мартинюк, доктор технічних наук, професор

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

Крилик, Л. В.

K82 Надійність та стандартизація приладів мікро- і нанoeлектроніки : навчальний посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 132 с.

В навчальному посібнику розглядаються актуальні питання аналізу надійності мікроелектронних приладів, трактується основні терміни та визначення, які відносяться до надійності в техніці, методи оцінки показників надійності мікроелектронних приладів, аналізуються основні види та механізми їх відмов, аналіз зовнішніх дій, що призводять до відмов. Навчальний посібник розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Надійність та стандартизація приладів мікро- і нанoeлектроніки» для студентів напряму підготовки «Мікро- та нанoeлектроніка».

УДК [621.382.004.15+006](075)

ББК 32.852-02ця73

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	5
1 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ	6
1.1 Математичний апарат для оброблення випадкових величин	6
1.2 Закони розподілу випадкових величин	13
2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПОКАЗНИКИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	21
2.1 Основні терміни та означення надійності.....	21
2.2 Системи та елементи. З'єднання елементів	22
2.3 Загальна характеристика показників надійності	24
2.4 Аналітичне визначення кількісних характеристик надійності виробів мікро - і напoeлектроніки.....	27
2.5 Визначення кількісних характеристик надійності виробів мікро- і напoeлектроніки за статистичними даними про відмови.....	33
3 ОСНОВНІ ВИДИ, ПРИЧИНИ ТА МЕХАНІЗМИ ВІДМОВ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ.....	39
3.1 Життєвий цикл мікроелектронних виробів та їх зв'язок із зовнішніми факторами	39
3.2 Класифікація відмов та аналіз залежності відмов від часу експлуатації	40
3.3 Оцінювання інтенсивності відмов приладів мікро- і напoeлектроніки.....	46
3.4 Механізми відмов активних елементів.....	51
3.5 Механізми відмов металізації та контактів.....	53
3.6 Механізми відмов в результаті дії механічних навантажень та при дії радіації.....	58
4 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ.....	63
4.1 Підвищення надійності шляхом вилучення потенційно ненадійних виробів	63
4.2 Підвищення надійності методом резервування.....	65
4.3 Підвищення надійності шляхом технологічного тренування.....	70
5 ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ.....	80
5.1 Загальна характеристика випробувань на надійність	80
5.2. Прискорені випробування приладів мікро- і напoeлектроніки на надійність.....	83
5.3 Планування прискорених випробувань на надійність	87
5.4 Контроль показників надійності при заданих планах випробувань.....	91
6 СТАНДАРТИЗАЦІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ	100
6.1 Основні означення та цілі стандартизації.....	100
6.2 Нормативні документи зі стандартизації і види стандартів.....	103

6.3 Особливості застосування нормативних документів і характер їхніх вимог.....	104
6.4 Державна та відомча служби стандартизації.....	107
6.5 Порядок використання стандартів та нагляд за їх дотриманням.....	109
6.6 Нормоконтроль технічної документації.....	111
7 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ.....	114
7.1 Лабораторна робота № 1. Статистична обробка емпіричних даних та визначення показників надійності невідновлюваних виробів.....	114
7.2 Лабораторна робота № 2. Показники і параметри надійності при відмовах типу зносу.....	118
7.3 Лабораторна робота № 3. Визначення кількісних характеристик надійності при відмовах з постійною інтенсивністю..	121
7.4 Лабораторна робота № 4. Планування випробувань на надійність.....	123
7.5 Лабораторна робота № 5. Підвищення надійності мікроелектронних приладів шляхом вилучення потенційно ненадійних виробів.....	125
7.6 Лабораторна робота № 6. Підвищення надійності мікроелектронних приладів шляхом застосування технологічного тренування.....	127
СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ.....	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	131

ПЕРЕДМОВА

Оцінювання показників надійності приладів мікро- і наноелектроніки є обов'язковою процедурою, яка виконується на етапі проектування апаратури. Актуальність задач із розрахунку надійності пояснюється тим, що вони дають відповідь на запитання про доцільність подальших витрат, які необхідні на відпрацювання технології і виробництва мікроелектронних приладів. Завдання на дипломне проектування проектів конструкторського і технологічного профілю містять опрацювання питань щодо оцінювання показників надійності приладів мікро- і наноелектроніки.

Навчальний план напряму підготовки „Мікро- та наноелектроніка” містить дисципліну „Надійність та стандартизація приладів мікро- і наноелектроніки”, яка передбачає вивчення основ теорії та методів оцінювання показників надійності приладів мікро- і наноелектроніки і складається з курсу лекцій, практичних занять та лабораторних робіт. Отримані навички та вміння студентів у питаннях надійності виробів мікро- та наноелектроніки будуть потрібними повною мірою в дипломному проектуванні.

В навчальному посібнику наведено необхідні відомості з теорії надійності та типові задачі для самостійного розв'язання. Окремий розділ присвячено лабораторному практикуму, де описано 6 лабораторних робіт, які впроваджено авторами в навчальний процес. Кожна робота розрахована на дві академічні години. Варіантів завдань достатньо для проведення індивідуального навчання. Для полегшення виконання лабораторних робіт наведено детальний порядок виконання робіт, який допомагає досягнути кінцевих результатів.

Всі лабораторні роботи розраховані на їх виконання за допомогою комп'ютерних технологій, при цьому можуть бути використані будь-які системи комп'ютерної алгебри.

Навчальний посібник призначено, насамперед, для самостійної роботи студентів, оскільки у ньому поєднано класичну теорію з практичними завданнями та лабораторними роботами. На думку авторів, це забезпечить швидке та якісне освоєння наведеного матеріалу.

1 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ

1.1 Математичний апарат для оброблення випадкових величин

Надійність (reability) виробів мікро- та наноелектроніки порушується виникаючими відмовами. *Відмови (refuse)* розглядають як випадкові події. Для кількісного оцінювання надійності використовуються методи теорії ймовірності та математичної статистики. Показники надійності можуть визначатися:

- аналітичним шляхом на основі математичної моделі – математичного визначення надійності;
- в результаті обробки дослідних даних – статистичне визначення показника надійності.

Момент виникнення відмови, частота виникнення відмов – величини випадкові. Тому базовими методами для теорії надійності є методи теорії ймовірності та математичної статистики.

Випадкова величина – величина, яка в результаті досліду набуває одного, наперед невідомого значення, залежного від випадкових причин. Випадкові величини можуть бути *дискретними* і *неперервними*.

Дискретними випадковими величинами називаються такі величини, значення яких утворюють дискретний скінченний або нескінченний ряд.

Наприклад: кількість бракованих приладів у даній партії або число відмов протягом певного часу.

Неперервними величинами – називаються величини, значення яких заповнюють цілий проміжок.

Відповідність між усіма можливими значеннями дискретної випадкової величини та їх ймовірностями називається *законом розподілу даної випадкової величини*.

Для характеристики закону розподілу випадкової величини використовуються *функції розподілу*.

Ймовірність (probability) того, що випадкова величина x набуває значень, менших або рівних значенню t , називається *інтегральною функцією розподілу*

$$F(t) = P(x \leq t). \quad (1.1)$$

Сума всіх ймовірностей дорівнює 1

$$F(t) = \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (1.2)$$

$F(t)$ – зростаюча ступінчаста функція для дискретних випадкових величин (ДВВ) і неперервна на всьому проміжку часу для неперервних випадкових величин (рис. 1.1). Її значення змінюються від 0 до 1.

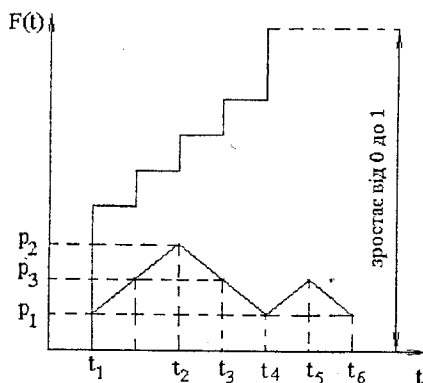


Рисунок 1.1 – Інтегральна функція розподілу дискретних випадкових величин

Графік неперервної випадкової величини (рис. 1.2) описується такою формулою

$$F(t) = \int_0^t p(t) dt. \quad (1.3)$$

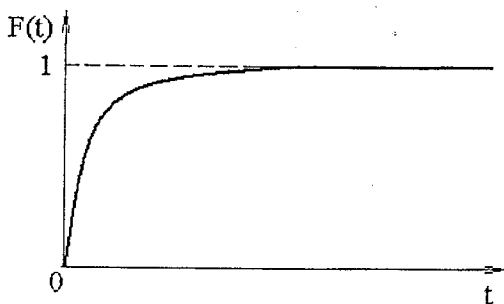


Рисунок 1.2 – Інтегральна функція розподілу неперервної випадкової величини

Диференціальна функція розподілу – це похідна від інтегральної функції за своїм аргументом. Її ще називають щільністю розподілу ймовірності.

$$f(t) = F(t) = \frac{dF}{dt}. \quad (1.4)$$

Графіком диференціальної функції розподілу називають криву розподілу (рис. 1.3). Площа фігури під кривою розподілу дорівнює 1.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1. \quad (1.5)$$

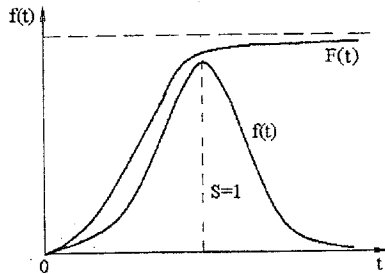


Рисунок 1.3 – Диференціальна функція розподілу

Диференціальна функція розподілу та інтегральна пов'язані між собою таким співвідношенням

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (1.6)$$

Ймовірність потрапляння випадкової величини в інтервал від t_1 до t_2 визначається за виразом:

$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt. \quad (1.7)$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (1.8)$$

Експериментальною оцінкою щільності ймовірності випадкової величини є *гістограма розподілу* випадкової величини (рис. 1.4)

Враховуючи, що при експериментах фіксуються значення випадкової величини, закон розподілу дискретної випадкової величини можна подати у вигляді таблиці 1.1. Така таблиця називається *рядом розподілу*.

Таблиця 1.1 – Ряд розподілу випадкової величини

t_i	t_1	t_2	t_3	...	t_n
p_i	p_1	p_2	p_3	...	p_n

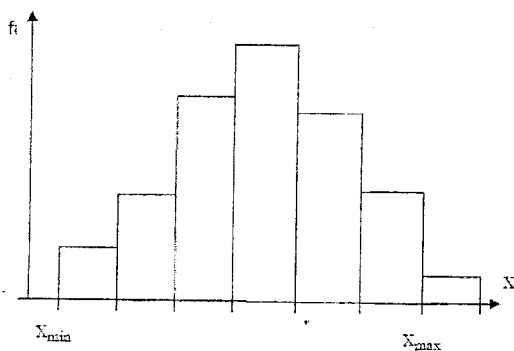


Рисунок 1.4 – Гістограма розподілу випадкової величини

Можна закон розподілу зобразити й графічно, відкладаючи на осі абсцис можливі значення випадкової величини, а на осі ординат – відповідні ймовірності. Для більшої наочності отримані точки з'єднуються прямолінійними відрізками. Отримана при цьому фігура називається *багатокутником (полігоном) розподілу* (див. рис. 1.1).

Для його побудови в прямокутній системі координат відкладають та з'єднують між собою точки з координатам (t_i, p_i) , де t_i – значення випадкової величини (вісь абсцис), p_i – ймовірність виникнення даного значення (вісь ординат).

Якщо досліджувана випадкова величина є неперервною або якщо число можливих значень дискретної величини досить велике, то ранжування і групування спостережуваних значень часто не дозволяють виділити характерні риси варіювання її значень. Це пояснюється тим, що окремі значення випадкової величини можуть досить мало відрізнятися одне від одного, і тому в сукупності спостережуваних даних однакові значення величини можуть зустрічатися рідко, а частоти варіантів мало відрізняються один від одного. У подібних випадках слід будувати *інтервальний варіаційний ряд розподілу*.

Для побудови такого ряду весь інтервал варіювання спостережуваних значень випадкової величини розбивають на ряд окремих інтервалів і підраховують частоту потрапляння значень величини в кожен окремий інтервал.

Інтервальним варіаційним рядом називають впорядковану сукупність інтервалів варіювання значень випадкової величини з відповідними частотами або відносними частотами потрапляння в кожен з них значень величини.

Для побудови інтервального ряду необхідно:

- визначити величину окремих інтервалів;
- визначити ширину інтервалів;
- встановити для кожного інтервалу його верхню і нижню межі;
- згрупувати результати спостереження.

Питання про вибір числа і ширини інтервалів групування доводиться вирішувати в кожному конкретному випадку, виходячи з цілей дослідження, обсягу вибірки і ступеня варіювання ознаки у вибірці.

Приблизно число інтервалів k можна оцінити, виходячи тільки з обсягу вибірки n за формулою Стержеса:

$$k = 1 + 3.32 \cdot N, \quad (1.9)$$

де N – кількість значень випадкової величини.

Зазвичай переважають інтервали однакової ширини. Для визначення ширини інтервалів h обчислюють:

- розмах варіювання значень вибірки R :

$$R = t_{\max} - t_{\min}, \quad (1.10)$$

де t_{\max} і t_{\min} – максимальна і мінімальна варіанти вибірки – *ліміти* ряду;

- ширину кожного з інтервалів h :

$$h = R/k. \quad (1.11)$$

Відповідно до шкали інтервалів проводиться групування значень ознаки – для кожного окремого інтервалу обчислюється сума частот варіант, що потрапили в i -й інтервал. При цьому в інтервал включають значення випадкової величини, більші або рівні нижній межі і менші за верхню межу інтервалу.

Графічним зображенням інтервального варіаційного ряду є гістограма розподілу (рис. 1.4). Для її побудови вздовж горизонтальної осі відкладають відрізки, рівні величині вибраного інтервалу і на них, як на основах, будуть прямокутники з висотами, рівними відповідній інтервальній частоті.

Закон розподілу повністю характеризує випадкову величину з імовірнісної точки зору. Однак при вирішенні багатьох практичних задач достатньо знати лише деякі числові параметри, які виражають найбільш характерні властивості (риси) закону розподілу випадкової величини. Такі числа називаються *числовими характеристиками випадкової величини*.

Для характеристики положення центра групування випадкових величин використовують такі математичні числові величини: *математичне сподівання, медіана та мода.*

Математичним сподіванням (або середнім значенням) дискретної випадкової величини x називається сума добутків всіх її можливих значень на відповідні ймовірності цих значень. Для дискретних величин математичне сподівання має вигляд

$$M(t) = \sum_{i=1}^n t_i p_i, \quad (1.12)$$

а для неперервних

$$M(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (1.13)$$

Значення математичного сподівання, визначене за результатами спостереження випадкової величини, називають *оцінкою математичного сподівання* M_t . Оцінювання математичного сподівання \overline{M}_t або \overline{T} здійснюється за виразом

$$\overline{M}_t = \overline{T} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N}. \quad (1.14)$$

Медіаною випадкової величини називають таке її значення, для якого виконуються рівність ймовірностей подій. Медіанне значення відповідає умові

$$M_{e_t} = P(t < M_{e_t}) = P(t > M_{e_t}) = 0,5. \quad (1.15)$$

При знаходженні медіани дискретного варіаційного ряду слід розрізняти два випадки: 1) обсяг сукупності непарний; 2) обсяг сукупності парний.

Якщо обсяг сукупності непарний і дорівнює $2n+1$, та варіанти розміщені в порядку зростання їх значень:

$$\underbrace{t_1, t_2, \dots, t_n}_{n \text{ значень}}, \quad t_{n+1}, \quad \underbrace{t_{n+2}, \dots, t_{2n+1}}_{n \text{ значень}}, \quad (1.16)$$

то $M_{e_t} = t_{n+1}$.

Якщо ж кількість елементів парна і дорівнює $2n$, то немає варіанти, яка б ділила сукупність на дві рівні за обсягом частини:

$$\underbrace{t_1, t_2, \dots, t_n}_{n \text{ значень}}; \underbrace{t_{n+1}, \dots, t_2}_{n \text{ значень}}. \quad (1.17)$$

Тому як медіана умовно береться півсума варіант, що знаходяться всередині варіаційного ряду:

$$M_{ei} = \frac{t_n + t_{n+1}}{2}. \quad (1.18)$$

Модю випадкової величини називається таке значення, при якому випадкова величина щільності розподілу має максимальне значення M_0 , тобто таке значення випадкової величини, яке зустрічається найчастіше в межах даного варіаційного ряду.

Якщо багатокутник розподілу (полігон) має два або кілька максимумів, то розподіл називається двомодальним або багатомодальним. Якщо всі значення ряду з'являються з однаковою частотою, то вважають, що даний варіаційний ряд не має моди. До характеристик, які описують розсіювання випадкової величини, відносяться дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації.

Дисперсія означає розсіювання і характеризує розкид випадкової величини відносно центра.

Для дискретних випадкових величин дисперсія визначається як

$$D_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (t_i - M_t)^2, \quad (1.19)$$

де $\frac{1}{N} \sum (t_i - M_t)$ позначається d_t і називається *середнім відхиленням*.

Для неперервних випадкових величин

$$D_t = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (t - M_t)^2 f(t) dt \quad (1.20)$$

або

$$D_t = M(t^2) - M^2(t). \quad (1.21)$$

Оскільки в багатьох випадках зручніше використовувати характеристику розсіювання, що має таку ж розмірність, як і сама випадкова величина, був запропонований ще один показник варіації — *середнє квадратичне (стандартне) відхилення*, яке обчислюється за виразом:

$$\sigma_i = \sqrt{D_i}. \quad (1.22)$$

Стандартне відхилення є мірою стабільності дослідних результатів, які стосуються однойменних випадкових величин.

Оцінювання розсіювання проводять за допомогою безрозмірної величини, використовуючи *коефіцієнт варіації*, рівний відношенню

$$V = \frac{\sigma_i}{T}. \quad (1.23)$$

Він показує, наскільки велике розсіювання порівняно із середнім значенням випадкової величини.

Розрізняють випадкові величини з малою варіацією ($V \leq 0,1$), середньою варіацією ($0,1 < V \leq 0,33$) і великою варіацією ($V > 0,33$). Якщо коефіцієнт варіації $V < 0,33$, то випадкова величина підпорядковується нормальному закону розподілу. Якщо коефіцієнт варіації $0,33 < V \leq 0,1$, то розподілу Вейбулла. Якщо коефіцієнт варіації $V = 1$, то рівноймовірному розподілу.

1.2 Закони розподілу випадкових величин

Надійність складних систем не може бути виміряна безпосередньо як будь-яка фізична величина. Вона може бути тільки кількісно оцінена або передбачена. Для оцінювання основних показників надійності використовують математичний апарат теорії ймовірності.

В теорії надійності найчастіше застосовують такі закони розподілу випадкових величин: *біноміальний закон* і *розподіл Пуассона* – для дискретних випадкових величин, *експоненціальний розподіл (exponential distribution)*, *розподіл Вейбулла (Weibull distribution)*, *нормальний (normal distribution)* і *логарифмічно-нормальний закон* – для неперервних випадкових величин.

1. *Біноміальний закон розподілу* характеризує ймовірність появи події n в m незалежних дослідах. Якщо ймовірність появи події n в одному досліді дорівнює p (відповідно, ймовірність його неяви дорівнює $1-p=q$), а кількість незалежних дослідів дорівнює m , то ймовірність появи події n в серії із m дослідів P_m^n може бути розрахована як:

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}, \quad (1.24)$$

де C_m^n – кількість комбінацій із m елементів по n , яка дорівнює

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!} \quad (1.25)$$

Необхідно мати на увазі, що C_m^n – ціле додатне число.

Основні характеристики біноміального закону розподілу такі:

- математичне сподівання

$$M(n) = pm; \quad (1.26)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(n) = M(n)q; \quad (1.27)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(n) = \sqrt{M(n)q}; \quad (1.28)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(n) = \sqrt{M(n)q} / pm. \quad (1.29)$$

Біноміальний закон застосовують при статистичному контролі якості, коли є дуже мало відомостей про поведінку пристроїв, а їх потрібно класифікувати на придатні та браковані.

2. Закон Пуассона використовується в таких випадках, коли на деякому інтервалі часу τ випадкова подія з'являється n разів, але з малою ймовірністю. Ймовірність виникнення n подій на інтервалі τ обчислюється таким виразом

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \exp(-\lambda\tau), \quad (1.30)$$

де λ – інтенсивність випадкової події, деяка додатна величина, яку називають параметром закону Пуассона.

Основні характеристики розподілу Пуассона:

- математичне сподівання

$$M(n) = \lambda\tau; \quad (1.31)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(n) = \lambda\tau; \quad (1.32)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(n) = \sqrt{\lambda\tau}; \quad (1.33)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(n) = \frac{1}{\sqrt{\lambda\tau}}. \quad (1.34)$$

Характерною особливістю розподілу Пуассона є рівність математичного сподівання і дисперсії

$$M(n) = \sigma^2(n). \quad (1.35)$$

Розподіл Пуассона – це граничний випадок біноміального розподілу. Біноміальний розподіл використовують для будь-якого p , а розподіл Пуассона – тільки для малого p .

Розподіл Пуассона зазвичай використовують для визначення ймовірності появи заданої кількості подій на заданому інтервалі часу за умови незалежності і несумісності подій.

3. *Експоненціальний закон* розподілу неперервної випадкової величини X має щільність розподілу

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \quad (1.36)$$

де λ – інтенсивність випадкової події, величина стала ($\lambda = \text{const}$).

Функція розподілу відповідно має вигляд:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - \exp(-\lambda x), \quad (1.37)$$

Основні характеристики експоненціального закону такі:

- математичне сподівання

$$M(x) = 1 / \lambda, \quad (1.38)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(x) = 1 / \lambda^2, \quad (1.39)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(x) = 1 / \lambda, \quad (1.40)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(x) = 1. \quad (1.41)$$

Експоненціальний закон використовують для оцінювання надійності складних пристроїв, відмови яких обумовлені великою кількістю комплектуючих елементів, що входять до їх складу, а також при дослідженні часу напрацювання до відмови *невідновлюваних технічних засобів (unrefurbishable hardware)* і для визначення часу між послідовними відмовами в виробках, які ремонтуються.

4. Закон Вейбулла характеризує розподіл неперервної випадкової величини X , яка може набувати тільки додатних значень ($X \geq 0$). Щільність розподілу має вигляд:

$$f(x) = \frac{m}{t_0} x^{m-1} \exp(-x^m / t_0), \quad (1.42)$$

де m і t_0 – параметри розподілу закону Вейбулла – сталі величини, які мають певні значення для кожного класу пристроїв.

Функція розподілу має вигляд:

$$F(x) = 1 - \exp(-x^m / t_0). \quad (1.43)$$

Основні характеристики закону Вейбулла такі:

- математичне сподівання

$$M(x) = b_m t_0^{\frac{1}{m}}; \quad (1.44)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(x) = C_m^2 t_0^{\frac{2}{m}}; \quad (1.45)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(x) = C_m \cdot t_0^{\frac{1}{m}}; \quad (1.46)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(x) = C_m / b_m, \quad (1.47)$$

$$\text{де } b_m = \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right);$$

$$C_m = \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)\right]^2},$$

де $\Gamma()$ – гамма-функція.

Розподіл Вейбулла використовують для оцінювання надійності пристроїв в період їх роботи, а також при зношуванні та старінні.

5. *Нормальний розподіл* неперервної випадкової величини x має щільність розподілу

$$f(x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right], \quad (1.48)$$

де a і b – параметри розподілу, сталі величини.

Основні характеристики розподілу:

- математичне сподівання

$$M(x) = a; \quad (1.49)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(x) = b^2; \quad (1.50)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(x) = b; \quad (1.51)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(x) = b/a. \quad (1.52)$$

Цей закон найчастіше зустрічається і використовується тоді, коли випадкова величина x залежить від великої кількості випадкових факторів, кожен з яких не має суттєвого впливу на результат. До нормального закону наближаються інші закони за типовими умовами, які часто зустрічаються.

6. *Логарифмічно-нормальний розподіл* неперервної невід'ємної величини x має місце, якщо її десятковий логарифм $z = \lg x$ розподілений за нормальним законом. Щільність розподілу величини x буде

$$f(x) = \frac{\mu}{x\sigma(z)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[z - M(z)]^2}{2\sigma^2(z)}\right\}, \quad (1.53)$$

де $\mu = 0,4343$.

Основні характеристики:

- математичне сподівання

$$x_{cp} = M(x) = x_0 \exp\left[\frac{\sigma^2(x)}{2\mu^2}\right]; \quad (1.54)$$

- дисперсія

$$\sigma^2(x) = x_{cp}^2 \left[\left(\frac{x_{cp}}{x_0}\right)^2 - 1 \right]; \quad (1.54)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(x) = x_{cp} \sqrt{\left[\left(\frac{x_{cp}}{x_0} \right)^2 - 1 \right]}; \quad (1.55)$$

- коефіцієнт варіації

$$V(x) = \frac{\sigma(x)}{M(x)}, \quad (1.56)$$

де $\lg x_0 = M(z)$.

Логарифмічно-нормальний розподіл використовують для оцінювання відмов внаслідок зношування та втомленості. Він також добре описує розподіл часу на пошук та усунення відмови.

Задачі для розв'язування

Задача 1.1. Дискретна випадкова величина t_i задана рядом розподілу ймовірності.

Таблиця 1.2 – Розподіл ймовірності випадкової величини t_i

t_i	3	5	7	11
p_i	0,12	0,25	?	0,15

Визначити невідому ймовірність p_7 . Знайти функцію розподілу $F(t)$ та побудувати її графік. Обчислити $M(t)$, $D(t)$, $\sigma(t)$.

Задача 1.2. Для неперервної випадкової величини задано функцію розподілу $F(t)$ неперервної величини t . Знайти $M(t)$, $D(t)$.

Функція розподілу $F(t)$ має вигляд:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < -4; \\ \frac{(t+4)^2}{16}, & -4 \leq t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

Задача 1.3. Для неперервної випадкової величини задано функцію розподілу $F(t)$ неперервної величини t . Знайти $M(t)$, $D(t)$.

Функція розподілу $F(t)$ має вигляд:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < -3; \\ \frac{(t+2)}{10}, & -3 \leq t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

Задача 1.4. Для неперервної випадкової величини задано функцію розподілу $F(t)$ неперервної величини t . Знайти $M(t)$, $D(t)$.

Функція розподілу $F(t)$ має вигляд:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < -2; \\ \frac{(2t+1)}{12}, & -2 \leq t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

Задача 1.5. Дискретна випадкова величина t_i задана рядом розподілу ймовірності.

Таблиця 1.3 – Розподіл ймовірності випадкової величини t_i

t_i	4	6	8	12
p_i	0,14	0,27	0,46	?

Визначити невідому ймовірність p_7 . Знайти функцію розподілу $F(t)$ та побудувати її графік. Обчислити $M(t)$, $D(t)$, $\sigma(t)$.

Задача 1.6.

В партії 10% нестандартних деталей. Навмання відібрані чотири деталі. Записати біноміальний закон розподілу дискретної випадкової величини n . Побудувати криву отриманого розподілу.

Задача 1.7. Неперервна випадкова величина t розподілена рівномірно на відріжку $[2; 4]$. Знайти $M(t)$, $D(t)$ та ймовірність потрапляння в інтервал $P(1 \leq t \leq 3)$.

Контрольні запитання

1. В чому полягає різниця між дискретною та неперервною випадковою величиною ?

2. Поясніть суть терміна «функція розподілу». Який графічний та аналітичний вигляд вона має для дискретної та неперервної випадкової величини ?

3. Наведіть характеристики положення центра групування випадкових величин.

4. Наведіть характеристики, які описують розсіювання випадкової величини.

5. Охарактеризуйте біноміальний закон розподілу дискретних випадкових величин.

6. В якому випадку на практиці застосовують закон Пуассона ?

7. Експоненціальний розподіл та його характеристики.

8. Нормальний розподіл та його характеристики.

9. Розподіли Вейбулла та логарифмічно-нормальний, їх характеристики. В яких випадках вони застосовуються ?

2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПОКАЗНИКИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

2.1 Основні терміни та означення надійності

Вся промислова продукція, в тому числі напівпровідникові прилади та інтегральні мікросхеми, характеризується таким показником як *якість*, яка являє собою комплекс властивостей продукції, що зумовлюють її придатність задовольняти необхідні потреби згідно з призначенням. Надійність є однією з фундаментальних складових властивостей продукції. Властивості продукції поділяють на прості і складні.

Надійністю приладів мікро- і наноелектроніки називають властивість, яка забезпечує можливість виконання цим виробом заданих функцій з заданими характеристиками у відповідних умовах експлуатації протягом необхідного проміжку часу. Стан виробу, при якому він виконує необхідні функції з відповідними характеристиками, називають *роботоздатністю*.

Властивість виробів зберігати *роботоздатність* (*capacity*) протягом необхідного проміжку часу називають *безвідмовністю* (*faultlessness*).

Порушення роботоздатності виробу називають *відмовою*. При цьому під порушенням стану роботоздатності розуміють або раптове припинення функціонування приладу; наприклад, через коротке замикання чи обрив, або значні зміни електричних параметрів, наприклад, підсилювальних властивостей транзистора, внаслідок чого перестає працювати схема, де він використовується. Внаслідок відмови виникає стан нероботоздатності, при якому виріб не задовольняє хоча б одну з технічних вимог, які від нього потрібні. Поява відмови не завжди означає втрату властивості надійності. Звичайно є вироби, використовувати які неможливо вже після першої відмови. Такі вироби називають неремонтопридатними (невідновлюваними) або виробами одноразової дії. Властивість, яка полягає в можливості від-

новити роботоздатність виробу після усунення відмови, називають *відновлюваністю*.

Більш загальним поняттям є властивість *ремонтпридатності* (*maintainability*) виробу, яка полягає в можливості передбачення, виявлення та усунення відмови шляхом виконання ремонтів і технічного обслуговування. В деяких випадках необхідно, щоб роботоздатність виробу була забезпечена до деякого моменту часу, на який намічено початок відповідної операції. При цьому не важливо чи була до вказаного моменту відмова, чи ні. Важливо, щоб пристрій знаходився в режимі чекання і почав в будь-який момент часу виконувати задачі, пропрацював безвідмовно в заданих умовах протягом необхідного інтервалу часу.

Стан роботоздатності пристрою в будь-який вибраний момент часу називають *готовністю*. Якщо пристрій в режимі чекання виявиться роботоздатним в будь-який вибраний момент часу і, починаючи з цього моменту, буде зберігати роботоздатність протягом заданого інтервалу часу, то тоді забезпечується оперативна готовність пристрою.

Для деяких пристроїв має значення властивість *збережності* (*safety*), тобто здатність безперервно зберігати справний і роботоздатний стан (задані характеристики) під час і після збереження та транспортування. Розглядають також граничний стан пристрою, при досягненні якого подальша його експлуатація припиняється, виходячи з безпеки або ефективності. Збереження роботоздатності до граничного стану називають *довговічністю* (*longevity*).

Характеристикою будь-якого приладу, пов'язаною з його експлуатацією, є *напрацювання* (*work*), яке являє собою проміжок роботи приладу. Напрацювання вимірюється в годинах безперервної або сумарної періодичної роботи в електричному режимі. Напрацювання приладу в годинах від початку експлуатації до настання граничного стану називають *технічним ресурсом* (*resource*). Відрізок часу від початку експлуатації до настання граничного стану називають *строком служби* (*term of exploitation*).

Під *напрацюванням до відмови* (*work is to the refuse*) мають на увазі сумарне напрацювання виробу від моменту вступу в роботу (експлуатацію) до виникнення першої відмови.

2.2 Системи та елементи. З'єднання елементів

Визначимо *систему* як технічний об'єкт, призначений для виконання певних функцій. Окремі частини системи називаються *елементами*. Один і той самий технічний об'єкт залежно від завдання, що вирішує конструктор або дослідник, може розглядатися як система або як елемент системи. Так, при проектуванні комп'ютера його можна розглядати як систему, що складається з комплектуючих елементів (мікросхем, конденсаторів, резисторів тощо), а при проектуванні деякої інформаційної системи (мережі) його ж можна розглядати як елемент системи поряд з іншими елементами

(моніторами, пристроями живлення тощо). Аналогічно мікросхема може розглядатися як система, коли конструктор вирішує завдання оцінювання надійності цієї мікросхеми на основі характеристик надійності й кількості складових її компонентів (транзисторів, резистивних компонентів, p - n переходів, паяння тощо).

Означення, що наводяться нижче, і характеристики часто відносяться рівною мірою й до систем, і до елемента систем. У таких випадках використовуються терміни об'єкт, виріб, які залежно від розв'язуваного завдання можуть трактуватися як система або як елемент системи.

Послідовне з'єднання елементів

З'єднання елементів називають послідовним, якщо відмова хоча б одного елемента системи призводить до відмови всієї системи. Таким чином, система послідовно з'єднаних елементів є мінімально необхідною для забезпечення роботоzдатності. Елемент такої системи називають основним.

Система послідовно з'єднаних елементів роботоzдатна тоді й тільки тоді, коли роботоzдатні всі її елементи.

Схематично така система показана на рис. 2.1.

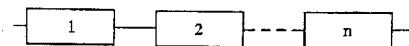


Рисунок 2.1 – Система послідовно з'єднаних елементів

Якщо позначити A – стан роботоzдатності системи, а A_k – стан роботоzдатності k -го елемента системи, то

$$A = \bigcap_{k=1}^n A_k, \quad (2.1)$$

де \bigcap – символ перетину подій (логічне І).

Паралельне з'єднання елементів

З'єднання елементів називають паралельним, якщо відмова системи відбувається тоді й тільки тоді, коли відмовлять всі елементи системи. Інакше кажучи, система паралельно з'єднаних елементів роботоzдатна, якщо роботоzдатний хоча б один її елемент. Схематично така система (із двох елементів) показана на рис. 2.2.

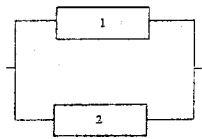


Рисунок 2.2 – Система паралельно з'єднаних елементів

У цьому випадку

$$A = \bigcup_{k=1}^n A_k, \quad (2.2)$$

де \bigcup – символ об'єднання подій (логічне АБО).

Складні з'єднання елементів

Система може складатися з підсистем, що містять різне число послідовних і паралельних елементів. Однак на практиці зустрічаються й такі системи, структури яких не можуть бути наведені до змішаного (послідовного й паралельного) з'єднання елементів, наприклад місткова система (рис. 2.3).

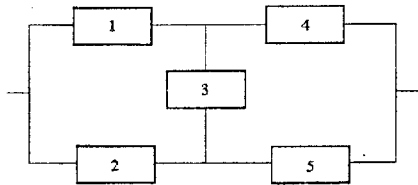


Рисунок 2.3 – Місткова система

Паралельні елементи в системі є надлишковими. Система, що має надлишковість відносно системи з мінімальною структурою, необхідною для виконання заданих функцій, буде й більше надійною. Резервний елемент забезпечує робоздатність системи при відмові основного. Резервування може бути двох видів:

а) постійне, коли й основний, і всі резервні (надлишкові) елементи перебувають в однакових умовах (робочому режимі) та одночасно виконують одні і ті ж задані функції;

б) із заміщенням, коли основний елемент, що відмовив, замінюється за допомогою перемикача, після чого резервний елемент виконує функції основного.

2.3 Загальна характеристика показників надійності

Надійність є комплексною властивістю виробу. Для опису різних сторін даної властивості на практиці користуються *показниками надійності*,

що являють собою кількісні характеристики однієї або декількох властивостей, які визначають надійність виробу.

На практиці використовують п'ять груп показників: показники безвідмовності; показники ремонтпридатності; показники довговічності; показники збережності (*safety*); комплексні показники надійності. Всі показники, крім комплексних, відносяться до одиничних показників. *Одиничним* вважають такий показник, який характеризує одну із властивостей, що характеризує надійність виробу: або безвідмовність, або ремонтпридатність та ін.

Комплексний показник характеризує декілька властивостей, із яких складається надійність виробу (дві або більше властивості).

Основні одиничні показники надійності, що використовуються в інженерній практиці, вказано в табл. 2.1. Вони записані за допомогою своїх умовних позначень, пояснення яких наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Основні складові і показники надійності

Надійність виробів					
Безвідмовність	Ремонтпридатність	Довговічність		Збережність	
		Ресурс	Термін служби	Термін збережності	Термін зберігання
$P(t_3)$	T_6	$t_{\text{ср}}^{(\text{рес})}$	$t_{\text{ср}}^{(\text{т сл})}$	$t_{\text{ср}}^{(\text{збж})}$	$t_{\text{ср}}^{(\text{збер})}$
$Q(t_3)$		$t_{\gamma}^{(\text{рес})}$	$t_{\gamma}^{(\text{т сл})}$	$t_{\gamma}^{(\text{збж})}$	$t_{\gamma}^{(\text{збер})}$
$t_{\text{ср}}$		t_{min}	$t_{\text{min}}^{(\text{т сл})}$	$t_{\text{min}}^{(\text{збж})}$	$t_{\text{min}}^{(\text{збер})}$
T_{γ}					
$\lambda(t)$					
T_0	G_B				

Таблиця 2.2 – Пояснення показників надійності

Позначення показника	Пояснення показника надійності
<i>Показники безвідмовності</i>	
$P(t_3)$	<i>Ймовірність безвідмовної роботи (probability of faultless work) за заданий час t_3</i>
$Q(t_3)$	<i>Ймовірність відмови (probability of refuse) за заданий час t_3</i>
$t_{\text{ср}}$	Середнє напрацювання до відмови. Якщо напрацювання виражається часом, то показник називають середнім часом безвідмовної роботи
T_{γ}	Гамма-відсоткове напрацювання до відмови (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)

Продовження таблиці 2.2 – Пояснення показників надійності

Позначення показника	Пояснення показника надійності
$\lambda(t)$	Інтенсивність відмов (<i>intensity of refuses</i>) в загальному випадку є функцією часу. Використовується як основна довідникова характеристика безвідмовності елементів, причому береться $\lambda(t) = \lambda_0 = const$ при напрацюванні, що дорівнює t_H (год)
T_0	Середнє напрацювання на відмову (напрацювання на відмову). Має фізичний сенс тільки для відновлюваних мікро- і наноелектронних приладів.
<i>Показники ремонтпридатності</i>	
T_e	Середній час відновлення приладів мікро- і наноелектроніки МН. Являє собою математичне сподівання часу відновлення
$P_e(t)$	Ймовірність відновлення приладів мікро- і наноелектроніки за заданий час t
τ_γ	Гамма-відсотковий час відновлення (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)
G_B	Середні витрати на відновлення приладів мікро- і наноелектроніки. Показує, скільки в середньому необхідно матеріальних засобів на відновлення роботоздатності
<i>Показники довговічності</i>	
$t_{cp}^{(рес)}$	Середній ресурс виробу. Являє собою математичне сподівання ресурсу виробів типу, що розглядається
$t_\gamma^{(рес)}$	Гамма-відсотковий ресурс (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)
t_{min}	Мінімальне напрацювання. Характеризує ресурсні можливості виробу, вважають, що t_{min} відповідає значенню $t_\gamma^{(рес)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(т сл)}$	Середній термін служби виробу. Являє собою математичне сподівання терміну служби виробів типу, що розглядається
$t_\gamma^{(т сл)}$	Гамма-відсотковий термін служби (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(т сл)}$	Мінімальний термін служби. Вважають, що $t_{min}^{(т сл)}$ відповідає відсотковому терміну служби $t_\gamma^{(т сл)}$ при $\gamma = 99,99\%$
<i>Показники збереженості</i>	

Продовження таблиці 2.2 – Пояснення показників надійності

Позначення показника	Пояснення показника надійності
$t_{\gamma}^{(збж)}$	Гамма-відсотковий термін збережності (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)
$t_{\min}^{(збж)}$	Мінімальний термін збережності. Вважають, що $t_{\min}^{(збж)}$ відповідає значенню $t_{\gamma}^{(збж)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{\text{ср}}^{(збер)}$	Середній термін зберігання виробу. Являє собою математичне сподівання терміну зберігання виробів типу, що розглядається
$t_{\gamma}^{(збер)}$	Гамма-відсотковий термін зберігання (зазвичай $\gamma \geq 90\%$)
$t_{\min}^{(збер)}$	Мінімальний термін зберігання. Вважають, що $t_{\min}^{(збер)}$ відповідає відсотковому терміну зберігання $t_{\gamma}^{(збж)}$ при $\gamma = 99,99\%$

2.4 Аналітичне визначення кількісних характеристик надійності виробів мікро- і напoeлектроніки

Для кількісного оцінювання надійності служать різні показники, які можна розділити на *одиничні* і *комплексні*.

Одиничним показником надійності (reability index) називають такий, який відноситься до однієї з властивостей виробу (безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності або збережності виробу).

Комплексним показником називають такий, який відноситься до декількох властивостей, що становлять надійність виробу. Комплексні показники надійності використовують для кількісної характеристики, в основному, тільки *відновлюваних технічних засобів (refurbishable hardware)*, тоді як одиничні показники – для характеристики будь-яких виробів. Вибір показників надійності даного конкретного виробу залежить від його призначення і характеру функціонування.

Розглянемо *одиничні показники* надійності, які характеризують безвідмовність і відновлюваність, а також *комплексні показники*, які відносяться до цих двох властивостей.

Основним показником безвідмовності є *ймовірність безвідмовної роботи*, під якою розуміють ймовірність того, що в межах заданого напруження відмова виробу не настає. Конкретне числове значення ймовірності безвідмовної роботи виробу має лише тоді, коли воно поставлене у відповідність заданому наробітку, протягом якого можливе виникнення відмови. В силу цього ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ розглядається за умови, що в початковий момент часу відліку заданого наробітку виріб

був роботоzдатним. Ймовірність безвідмовної роботи можна записати у вигляді:

$$P(t) = 1 - F(t). \quad (2.3)$$

де $F(t)$ – інтегральна функція розподілення.

Функція плавно зменшується від одиниці до нуля (допускається, що в момент ввімкнення виріб роботоzдатний). Графік функції показано на рис. 2.4.

В деяких випадках крім показника ймовірності безвідмовної роботи використовують показник *ймовірності відмови*, визначаючи його як ймовірність того, що виріб відмовить протягом заданого часу роботи, будучи роботоzдатним в початковий момент часу. Ймовірність відмови $Q(t)$ визначають за формулою:

$$Q(t) = F(t) = 1 - P(t). \quad (2.4)$$

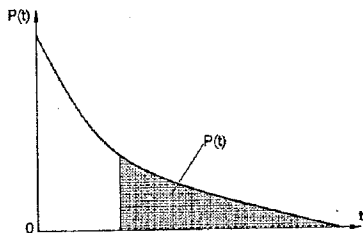


Рисунок 2.4 – Ймовірність безвідмовної роботи

В цьому випадку ймовірність відмови $Q(t)$ збігається з інтегральною функцією розподілення наробітку до відмови. Графік функції $Q(t)$ наведено на рис. 2.5. Якщо функція $Q(t)$ диференційовна, то безвідмовність можна характеризувати також *щільністю ймовірності* моменту першої відмови, яка визначається за формулою:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.5)$$

З формули (2.5) випливає, що ймовірність безвідмовної роботи на проміжку $(0; t)$ дорівнює інтегралу від моменту часу до нескінченності (тобто, площі під кривою щільності ймовірності, показаний на рис. 2.5).

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (2.6)$$

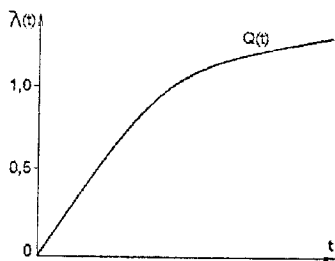


Рисунок 2.5 – Ймовірність відмов

Особливістю функцій $Q(t)$ і $f(t)$ є те, що вони односторонні, тобто то-тожно рівні нулю при $t < 0$. Значення $Q(t) > 0$ при $t < 0$ вводять інколи для опису відмов при збереженні.

Іншою важливою диференційною характеристикою безвідмовності є *інтенсивність відмов* $\lambda(t)$, під якою розуміють умовну щільність ймовірності виникнення відмов виробу, яка визначається для розглянутого моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Згідно з означенням інтенсивність відмов визначається щільністю ймовірності, віднесеною до ймовірності безвідмовної роботи виробу на даний момент часу відповідно за формулою:

$$\lambda(t) = f(t) | P(t). \quad (2.7)$$

З врахуванням (2.3) і (2.5) одержимо

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{1}{1-F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}. \quad (2.8)$$

Тут необхідно звернути увагу на те, що інтенсивність відмов як показник безвідмовності має місце тільки у випадку невідновлюваних об'єктів, до яких відносяться прилади мікро- і наноелектроніки.

Інтенсивність відмов можна використати для визначення ймовірності безвідмовної роботи і встановлення функціональної взаємозалежності між показниками надійності. Використовуючи вираз (2.5), запишемо

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{P(t)dt}. \quad (2.9)$$

Інтегруючи вираз (2.9) методом розділення змінних, розв'яжемо його відносно $P(t)$:

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt;$$

$$\ln[P(t)] = -\int_0^t \lambda(t)dt;$$

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]. \quad (2.10)$$

З виразу (2.10) видно, що основний показник надійності – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ являє собою експоненціальну функцію, котра в межах часу $(0..∞)$ змінюється від 1 до 0. Ймовірність відмови $Q(t)$, яка відображає випадок, протилежний безвідмовній роботі в тих же межах часу, змінюється від 0 до 1. Використовуючи це, можна записати:

$$Q(t) = -\int_0^t f(t)dt, \quad \text{при } t \rightarrow \infty \quad Q(t) = \int_0^t f(t)dt = 1.$$

Враховуючи (2.4), виразимо ймовірність безвідмовної роботи через щільність ймовірності відмови $f(t)$:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^{\infty} f(t)dt - \int_0^t f(t)dt = \int_0^{\infty} f(t)dt. \quad (2.11)$$

Вигляд залежностей $P(t)$ і $Q(t)$ показано на рис. 2.4, 2.5. З рисунків видно, що ймовірність безвідмовної роботи монотонно зменшується із зростанням напрацювання, а ймовірність відмови збільшується. Таким чином, запас надійності, який має прилад на початку в момент часу $t = 0$, поступово витрачається і при досить довгій експлуатації прилад стає практично нероботоздатним.

Функціональний зв'язок між показниками надійності наведено в таблиці 2.3.

Безвідмовність різних мікро- та наноелектронних приладів, які в більшості відносяться до відновлюваних об'єктів, характеризується *поток*ом відмов, котрий являє собою відношення кількості відмов об'єкта за довільно малий наробіток до величини цього наробітку.

Таблиця 2.3 – Функціональний зв'язок між показниками надійності

Відома функція	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	-	$1-P(t)$	$-\frac{d}{dt}[P(t)]$	$-\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d}{dt}[P(t)]$
$Q(t)$	$1-Q(t)$	-	$\frac{d}{dt}[Q(t)]$	$-\frac{1}{1-Q(t)} \cdot \frac{d}{dt}[Q(t)]$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$\int_0^t f(t)dt$	-	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$
$\lambda(t)$	$\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	$1-\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	$\lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$	-

Щільність ймовірності і інтенсивність відмов мають розмірність год^{-1} , під якою розуміють кількість відмов за одну годину роботи. Значення інтенсивності відмов в більшості сучасних приладів, залежно від умов експлуатації, лежить в межах $10^{-7} \div 10^{-8} \text{ год}^{-1}$. Тому для спрощення запису в перекладній літературі використовують інші одиниці вимірювання, такі, наприклад, як *фiт*. Один *фiт* (*Failure in Time*) дорівнює 10^{-9} год^{-1} . Інтенсивність відмов виробу в 10^{-8} год^{-1} буде дорівнювати 10 фiтам.

Використовуючи диференційні показники, можна формувати інші показники безвідмовності, такі як *середнє напрацювання до відмови (middle work)*, яке являє собою математичне сподівання наробітку виробу до першої відмови

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2.12)$$

і гамма-відсоткове напрацювання до відмови t_{γ} , яке визначається як напрацювання, протягом якого відмови виробу не виникає з ймовірністю γ , поданою у відсотках. Цей показник визначається з рівняння

$$P(t) = 1 - \int_0^{t_{\gamma}} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (2.14)$$

Запис у технічній документації «90-відсоткове напрацювання до відмови становить не менше 500 год» означає, що у 90% виробів даного виду протягом сумарного напрацювання, що дорівнює 500 год, відмова не виникає.

При визначенні середнього напрацювання до відмови враховуються всі можливі значення напрацювання в інтервалі часу від 0 до ∞ , в тому числі набагато менші і значно більші за середнє значення напрацювання. Внаслідок цього середнє значення напрацювання, будучи тісно пов'язаним з ймовірністю безвідмовної роботи, відображає порівняно невисокий його рівень. Наприклад, для експоненціального розподілу середнє напрацювання до відмови відповідає значенню ймовірності безвідмовної роботи, рівному 1000 годин, ймовірність досягнення напрацювання 1500 год менше 0,37 та із зростанням напрацювання порівняно з середнім напрацюванням, ймовірність безвідмовної роботи зменшується, досягаючи нульового рівня на границі. З метою оцінювання напрацювання при задовільному рівні безвідмовної роботи і введено поняття *гама-відсоткового напрацювання*. Так, для того ж експоненціального розподілу гамма-відсоткове напрацювання при $P(t_\gamma) = 0,9$ буде приблизно в 10 раз меншим, а при $P(t_\gamma) = 0,99$ в 100 раз меншим за середнє напрацювання до відмови. Це означає, що при середньому напрацюванні до відмови, рівному 1000 годин, ймовірність безвідмовної роботи на рівні 0,99 забезпечується тільки на перших 10 год роботи виробу. Або в партії з 100 виробів, які працюють в однакових умовах і характеризуються середнім наробітком до відмови в 1000 год через 10 год роботи з ймовірністю 0,99 залишаються роботоздатними 99 виробів, через 100 год – 90. А через 1000 год всього близько 37 виробів будуть роботоздатними.

Показником *довговічності* є *середній ресурс* (математичне сподівання ресурсу) і *гамма-відсотковий ресурс*. Останній являє собою напрацювання, протягом якого виріб не досягає граничного стану із заданою ймовірністю γ , поданою в процентах. Співвідношення між цими показниками такі, як і між розглянутими раніше показниками безвідмовності.

Крім того, до показників довговічності відносяться *середній термін служби* (математичне сподівання терміну служби) і *гамма-відсотковий термін служби*, який визначається як календарна тривалість експлуатації виробу, протягом якої він досягає граничного стану із заданою ймовірністю γ , поданою в процентах. Співвідношення між ресурсом і терміном служби одного й того ж типу виробу може змінюватись залежно від інтенсивності його експлуатації. Наприклад, ресурс виробів, рівний 8000 год, може бути використаний протягом одного року при експлуатації в апаратурі, яка працює в безперервному режимі, та протягом 10 років і більше – в апаратурі періодичної дії при середніх витратах ресурсу 700...800 год за рік.

Показником *збережності* є *середній термін збережності* (математичне сподівання, терміни збережності) і *гамма-відсотковий термін збережності*, визначений як термін збережності, який досягається виробом, із заданою ймовірністю γ , поданою у відсотках.

Показники довговічності і збережності визначаються за формулами, ідентичними формулам, які описують показники безвідмовності. При

$\gamma=100\%$ гамма-відсоткове навантаження (ресурс, термін служби, термін збережності) називають встановленим безвідмовним напрацюванням (встановленим ресурсом, встановленим терміном збережності); при $\gamma=50\%$ гамма-відсоткове напрацювання (ресурс, термін служби, термін збережності) називають медіанним напрацюванням (ресурсом, терміном служби, терміном збережності).

До показників ремонтпридатності належить *ймовірність відновлення роботоздатного стану* $P_e(t)$ – ймовірність відновлення роботоздатного стану виробу протягом часу t

$$P_e(t) = \int_{t_0}^t f_e(t) dt,$$

де f_e – щільність (частота) відновлення.

Середній час відновлення (mean time of renewal) T_e – математичне сподівання часу відновлення роботоздатного стану виробу після відмови

$$T_e = \int_0^{\infty} t \cdot f_e(t) dt.$$

2.5 Визначення кількісних характеристик надійності виробів мікро- і наноелектроніки за статистичними даними про відмови

Для визначення показників надійності згідно із статистичними даними про відмови будемо виходити з того, що в розпорядженні є партія з N виробів, які піддаються випробуванням в однакових умовах протягом деякого часу до відмови всіх виробів в партії. Введемо такі позначення:

N – кількість приладів, роботоздатних в початковий момент часу;

n_i – кількість приладів, що відмовили на момент часу t_i від початку випробувань або експлуатації;

N_i – кількість приладів, роботоздатних на момент часу t_i від початку випробувань або експлуатації;

$n_i(\Delta t)$ – кількість відмов в i -тому інтервалі напрацювання $(t_{i-1}; t_i)$;

Δt – величина інтервалу напрацювання, що розглядається.

Нехай в процесі випробувань забезпечується безперервний контроль часу роботи виробів і фіксація моменту часу настання відмови. Враховуючи прийняті припущення, основні показники безвідмовності визначаються таким чином.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ в проміжку часу від 0 до t_i визначається як відношення кількості виробів, які безвідмовно пропрацюва-

ли до моменту часу t_i , до кількості виробів, придатних в початковий момент часу $t = 0$

$$P(t) = 1 - \frac{n_i}{N} = \frac{N_i}{N}. \quad (2.15)$$

Для проміжних розрахунків використовують показник у вигляді імовірності відмов $Q(t)$. Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ об'єкта пов'язана з імовірністю відмови $Q(t)$ таким співвідношенням:

$$P(t) = 1 - Q(t).$$

Тоді наближене значення ймовірності відмови

$$Q(t) = 1 - \frac{N - n_i}{N} = \frac{n_i}{N}. \quad (2.16)$$

Ймовірність безвідмовної роботи зменшується зі збільшенням часу роботи або напрацювання об'єкта.

Щільність ймовірності відмови або частота відмов (frequency of refuses) – відношення кількості виробів, що відмовили за одиницю часу, до початкової кількості виробів, які спостерігаються, за умови, що виробу, які відмовили, не відновлюються і не замінюються новими

$$f(t_i) = \frac{n_i(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}. \quad (2.17)$$

Як правило, за результатами розрахунків значень функцій в моменти контролю справності виробів, що випробовуються, будується графічне зображення експериментально отриманого показника надійності. Потім підбирають теоретичний закон розподілу, який найбільш точно описував би експериментально отриману криву, визначаються параметри цього закону. В подальшому знайдений закон використовують при розрахунках.

Для визначення *інтенсивності відмов* $\lambda(t)$ за експериментальними даними користуються виразом

$$\lambda(t_i) = \frac{n_i(\Delta t)}{N_i \Delta t}. \quad (2.18)$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ відрізняється від щільності розподілу нароби-тку до відмови $f(t)$ тим, що в першому випадку розрахунок ведеться відно-

сно числа справних виробів на момент часу t , а у випадку щільності розподілу – на момент часу $t = 0$.

Середнє напрацювання до відмови – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови. Даний показник часто називають середнім часом безвідмовної роботи.

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{0i}}{N}, \quad (2.19)$$

де t_{0i} – напрацювання до відмови i -го приладу;

N – кількість приладів, що поставлена на випробування.

Існує інший аналітичний вираз визначення середнього часу безвідмовної роботи

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cp,i}}{n}, \quad (2.20)$$

де n – загальна кількість виробів, що відмовила;

n_i – кількість виробів, які відмовили на i -ому інтервалі часу;

$t_{cp,i} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}$ – середини часових інтервалів;

m – кількість інтервалів часу.

Середнє напрацювання на відмову – середнє значення часу між сусідніми відмовами:

$$T_0 = \frac{\sum_{i=0}^n t_i}{n}, \quad (2.21)$$

де t_i – час роботоздатності системи між $(i-1)$ -ю та i -ю відмовами;

n – кількість відмов за час t .

Напрацювання на відмову n виробів

$$T_{0n} = \frac{\sum_{i=0}^n t_{cp,i}}{n}, \quad (2.22)$$

де n – кількість виробів, що відмовили.

Параметр потоку відмов $\omega(t)$ (граничне значення відношення ймовірності появи хоча б однієї відмови за проміжок часу Δt) на практиці визна-

часться як середня кількість відмов ремонтowanego пристрою за одиницю часу

$$\alpha(t) = \frac{n_i(\Delta t)}{N\Delta t}. \quad (2.23)$$

Щільність відновлення (частота відновлення) за експериментальними даними визначається як

$$f_g(t) = \frac{\Delta n_g}{N_{g.o}\Delta t}, \quad (2.24)$$

де Δn_g – число виробів, відновлених за Δt ,

$N_{g.o}$ – число виробів, що підлягало ремонту (відновленню).

Ймовірність відновлення роботоздатного стану $P_g(t)$ – ймовірність відновлення роботоздатного стану виробу протягом часу t

$$P_g(t) = \frac{N_{g.i}}{N_{g.o}}, \quad (2.25)$$

де $N_{g.i}$ – число виробів, відновлених протягом інтервалу від 0 до t ,

$N_{g.o}$ – вироби, які необхідно відновити.

Середній час відновлення T_g має таке статистичне визначення

$$T_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{gi}, \quad (2.26)$$

де T_{gi} – тривалість відновлення роботоздатності i -го виробу або тривалість відновлення після кожної відмови,

n – число відновлених виробів (або число відновлень i -го виробу).

Інтенсивність відновлення $\lambda_g(t)$ статистично визначається як

$$\lambda_g(t) = \frac{\Delta n_g}{N_g\Delta t} = \frac{1}{T_g}, \quad (2.27)$$

де Δn_g – число виробів, відновлених протягом інтервалу Δt ,

N_g – число виробів, які потребують відновлення після закінчення Δt .

Коефіцієнт готовності виробів K_r

$$K_{\Gamma} = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + T_{\theta}} = \frac{\lambda_{\theta}(t)}{\lambda_{\theta}(t) + \lambda(t)}, \quad (2.28)$$

де t_{cp} – середнє напрацювання до відмови (середній час безвідмовної роботи),

T_{θ} – середній час відновлення (ремонт),

$\lambda_{\theta}(t)$ – інтенсивність відновлення,

$\lambda(t)$ – інтенсивність відмов.

8. Коефіцієнт простою виробу K_{Π}

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}$$

Задачі для розв'язування

Задача 2.1

При випробуванні 1000 однотипних мікроелектронних приладів за 3000 год відмовило 80. Визначити показники надійності: ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ та ймовірність відмови роботи $Q(t)$.

Задача 2.2 Досліджувалось 1500 виробів, протягом 120 год роботоздатних залишилось 1350, ще протягом 200 год роботоздатних залишилось 820. Обчисліть параметр потоку відмов виробів.

Задача 2.3 Система складається з 5 приладів, в якій зафіксовано n_i відмов кожного i -го приладу за свій i -тий час t_i :

$$t_1 = 2200 \text{ год}, t_2 = 2200 \text{ год}, t_3 = 2321 \text{ год}, t_4 = 580 \text{ год}, t_5 = 420 \text{ год},$$

$$n_1 = 53, n_2 = 44, n_3 = 38, n_4 = 18, n_5 = 3.$$

Крім того, прилади системи відновлювались в середньому за 10, 21, 14, 8, 15 хвилин. Необхідно визначити середнє напрацювання на відмову системи, середній час відновлення системи та її коефіцієнт готовності.

Задача 2.4 За період спостереження за роботою одного виробу було зареєстровано 15 відмов. До початку спостереження виріб пропрацював без відмов 258 год. До кінця спостереження напрацювання виробу становить 1233 год. Необхідно визначити напрацювання на відмову.

Задача 2.5 На випробування поставлено 7 однотипних виробів. Отримано такі значення часу безвідмовної роботи i -го виробу: $t_1 = 220$ год,

$t_2 = 260$ год, $t_3 = 320$ год, $t_4 = 380$ год, $t_5 = 420$ год, $t_6 = 360$ год, $t_7 = 320$ год. Обчисліть середній час безвідмовної роботи партії виробів.

Задача 2.6 Визначити напрацювання на відмову системи, яка складається з 5 приладів, якщо зафіксовано n_i відмов кожного i -го приладу за свій i -тий час t_i :

$t_1 = 1220$ год, $t_2 = 1260$ год, $t_3 = 2320$ год, $t_4 = 480$ год, $t_5 = 320$ год,
 $n_1 = 53$, $n_2 = 44$, $n_3 = 38$, $n_4 = 18$, $n_5 = 3$.

Задача 2.7 На випробування поставлено 1000 однотипних транзисторів. За перші 4000 год відмовили 100 штук. За інтервал 4000–5000 годин відмовили ще 60 штук. Визначити інтенсивність $\lambda(t)$ та частоту відмов $f(t)$ для проміжку часу 4000–5000 годин.

Контрольні запитання

1. Перерахуйте відомі кількісні показники надійності невідновлюваних виробів.

2. Як визначається середнє напрацювання до відмови?

3. Що називається надійністю приладів мікро- і наноелектроніки?

4. Дайте означення понять "безвідмовність", "відмова", "роботоздатність".

2. Як визначити ймовірність безвідмовної роботи групи виробів, маючи статистичні дані про їх напрацювання? Чи можна використати такий показник на практиці?

3. Що таке ймовірність відмови виробу та як її визначити, маючи статистичні дані про напрацювання групи виробів до відмови?

4. Запишіть формулу та дайте означення щільності ймовірності відмови.

5. В яких одиницях вимірюють напрацювання виробів? Що таке середнє напрацювання виробу до відмови?

6. Які показники характеризують ремонтпридатність виробів мікро- і наноелектроніки?

7. Як визначається середній час відновлення та інтенсивність відновлення приладів мікро- і наноелектроніки?

8. Що таке інтенсивність відмов? Запишіть вираз для її визначення.

9. Що таке ймовірність відмови виробу та як її визначити?

10. Дайте означення гамма-відсоткового напрацювання. Які стандартні рівні цієї величини використовуються для приладів мікроелектроніки?

3 ОСНОВНІ ВИДИ, ПРИЧИНИ ТА МЕХАНІЗМИ ВІДМОВ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

3.1 Життєвий цикл мікроелектронних виробів та їх зв'язок із зовнішніми факторами

Для оцінювання впливу різних факторів на надійність приладів мікро- і наноелектроніки бажано розглянути так званий *життєвий цикл виробу* від моменту виникнення ідеї його створення до експлуатації в апаратурі. При цьому необхідно виділити основні фактори, домінуючі протягом окремих періодів циклу, які можна назвати *етапами*. Слід зауважити, що поняття життєвого циклу виробу та окремі його етапи – категорії умовні. Але вони дозволяють в загальних рисах показати основні тенденції впливу зовнішніх факторів на параметри виробів та їх надійнісні характеристики.

Існування виробу починається з *формування технічних вимог* до нього. Факторами, які обумовлюють цей етап, є, в першу чергу, потреби вдосконалення тієї чи іншої апаратури, компетентність фахівців, які експлуатують і розробляють її, їх спроможність правильно оцінити можливість модернізації апаратури в потрібному напрямку і необхідність створення нового приладу.

Найбільш важливим є етап *розробки приладу*. Успіх розробки визначається етапом фундаментальних теоретичних знань, які можуть бути покладені в основу конструювання приладу, ступінню узагальнення досвіду аналогічних розробок, теоретичними положеннями і науковими досягненнями суміжних технічних напрямків, рівнем обладнання, яке знаходиться в розпорядженні розробника, початковою якістю матеріалів, кваліфікацією і творчою інтуїцією науково-технічного персоналу. Найбільш важливим цей етап є тому, що тут поряд з основними фізичними і електричними параметрами закладаються надійнісні характеристики виробу, які обумовлюють його подальшу долю. На всіх подальших етапах життєвого циклу приладу вже неможливо вжити будь-яких заходів, які покращували б закладені при розробці надійнісні характеристики.

На етапі *виробництва* реалізуються всі параметри, в тому числі і надійнісні характеристики, закладені при розробці. Цей етап обумовлюють вихідні матеріали, досконалість технології і обладнання, методи і обладнання контролю, кваліфікація інженерного і виробничого персоналу. Найкращим досягненням етапу виробництва можуть бути надійнісні характеристики, закладені при розробці. Від того, наскільки правильно вибраний перелік приладів, які входять до апаратури, режими їх роботи, використані методи захисту від різних перевантажень, залежить подальший успіх функціонування апаратури і безвідмовність використаних в ній приладів.

При виробництві приладів мікро- і наноелектроніки реалізуються надійнісні характеристики, закладені при їх розробці і відповідно зберігаються надійнісні характеристики приладів. Тут дуже важливо підкреслити,

що характеристики приладів, в кращому випадку, зберігаються. В дійсності вже при проведенні вхідного контролю в споживача починається витрата ресурсу приладу. Певною мірою ресурс витрачається під час термо- та електротренувань в процесі формування виводів та монтажу, при випробуванні мікроелектронних приладів перед відправленням споживачу. На цьому етапі внаслідок неправильного ставлення прилад може бути повністю або частково виведений з ладу. Найбільш небезпечні часткові пошкодження у вигляді прихованих дефектів, котрі можуть бути виявлені тільки на наступних етапах життєвого циклу приладу.

Заключним в життєвому циклі приладу є етап *експлуатації* в складі апаратури. Це головний період в життєвому циклі, тому що на ньому прилад виконує функції за своїм основним призначенням. Визначним фактором при цьому є режим і експлуатаційні правила. Якщо всі попередні етапи пройшли в оптимальних умовах, використовуються такі режими, що ресурс виробу витрачається економно, експлуатаційні правила розроблені і їх дотримуються, то висока надійність функціонування приладу в складі апаратури буде забезпечена.

3.2 Класифікація відмов та аналіз залежності відмов від часу експлуатації

Як було зазначено раніше, відмовою називається подія, що полягає в порушенні роботоздатності виробу. Причинами відмов ІМС можуть бути помилки, допущені при конструюванні або розробленні технологічного процесу виготовлення, дефекти процесу виробництва, порушення норм експлуатації та зберігання, а також природні процеси старіння. Основними причинами відмов є дефекти, що вносяться в процесі виробництва (~ 90%) і в результаті порушень правил експлуатації (~ 10%).

У групі дефектів, що виникають в процесі виробництва, приблизно 50% становлять неякісні з'єднання, в тому числі плівкові, контактні (на границі провідників, виконаних з різних матеріалів, або тих, що відрізняються конструктивно), а також дротяні та ін. Найбільш часто дефекти утворюються в місцях контактних з'єднань в результаті, наприклад, неякісно проведених технологічних операцій термокомпресії, паяння або зварювання. Ці види дефектів притаманні як напівпровідниковим, так і гібридним ІМС і МСБ. Крім неякісних з'єднань, найбільш характерними для ГІС і МСБ є дефекти, зумовлені наявністю навісних компонентів. Це пояснюється не тільки додатковою кількістю внесених ними контактних з'єднань, але і дефектами, пов'язаними з їх неякісним закріпленням на платах ГІС та МСБ. Значна кількість відмов напівпровідникових ІМС пов'язана з дефектами, що утворюються в результаті неякісного проведення фотолітографічних процесів. Наприклад, видалення окисної шівки там, де цього не повинно бути, призводить до утворення зайвих легованих облас-

тей і змикання р-п переходів при подальшому дифузійному процесі, утворення короткого замикання металізації з поверхнею напівпровідника та ін.

На даний час існують різні схеми класифікації відмов. Одна із схем подана в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація відмов приладів мікро- і наелектроніки та їх елементів

<i>Класифікаційна ознака</i>	<i>Вид відмови</i>
Характер виникнення відмов	Раптові Поступові
Час існування відмови	Постійні Тимчасові Пережовувальні (тимчасові відмови, що йдуть одна за одною)
Характер прояву відмови	Явні Неявні
Залежність відмов між собою	Залежні Незалежні
Причина виникнення	Конструкційні Виробничі Експлуатаційні Деградаційні

Раптова відмова (миттєва) – це відмова, що характеризується стрибкоподібною зміною значення одного або декількох параметрів виробу. Така відмова призводить до повної втрати роботоздатності виробу. Причинами раптових відмов є, наприклад, порушення контактних з'єднань, пробій діелектричної плівки в МДН-структурі та ін.

Під поступовою (параметричною) відмовою розуміють відмову, що виникає в результаті постійної, зазвичай неперервної і монотонної зміни значення одного або декількох функціональних параметрів виробу і виходу їх за межі норм, вказаних в технічній документації. Причини поступових відмов полягають в протіканні фізико-хімічних процесів, що змінюють властивості матеріалів, контактних з'єднань, р-п переходів. Наприклад, потрапляння вологи в корпус мікросхеми викликає зміну стану поверхні напівпровідникового кристала і призводить до підвищення струмів витоку. До подібних процесів відноситься також електроміграція іонів на поверхні кристала, яка веде до виникнення коротких замикань і інших порушень. Іноді в ІМС спостерігаються відмови *пережованого* характеру, тобто такі, що багаторазово виникають і зникають. Причинами їх можуть бути, наприклад, сторонні частинки, що потрапили в об'єм корпусу виробу.

Приблизний розподіл числа відмов приладів мікро- і наноелектроніки: відмови через помилки проектування – 40...50%, відмови через помилки виробництва – 30...40%, відмови через неправильні дії оператора – 20...30%.

Відмічено, що в 75...80% випадків різноманітні причини відмов дають про себе знати у вигляді відмов елементів. Це накладає помітний психологічний відбиток на споживачів щодо істинних причин відмов.

При аналізуванні відмов дуже важливо встановити етап життєвого циклу приладу, який є першою причиною виникнення відмов. Через це розрізняють *конструкційні відмови*, які виникають як наслідок помилок і порушень правил та норм конструювання в період розробки. При виявленні таких відмов повинні бути вжиті відповідні заходи із доопрацювання конструкції приладу, які викликають появу подібних помилок в наступних партіях приладу.

Розрізняють також *виробничі відмови*, які виникають через порушення встановленого технологічного процесу виготовлення виробу і його недосконалої.

Експлуатаційні відмови виникають через порушення встановлених умов експлуатації виробу. Причинами виникнення цих відмов може бути неправильна оцінка можливостей виробу, перевантаження, несприятливі дії навколишнього середовища.

Розглянуті вище терміни знайшли своє відображення в Державних стандартах і НТД та є обов'язковими при класифікації відмов.

На практиці використовують інші терміни. Так, відмови приладів мікро- і наноелектроніки за *зовнішніми проявами* можна розділити на *короткі замикання, обриви і зміни параметрів*. Короткі замикання і обриви відносять до так званих "*катастрофічних відмов*". Ці відмови є раптовими і повними. На відміну від них відмови, зумовлені зміною параметрів, бувають, як правило, частковими і з часом розвиваються поступово. Тому їх називають "*деградаційними*" відмовами.

Зовнішні дії, і особливо теплові та електричні навантаження, прискорюють взаємодію та генерацію дефектів. Внаслідок цього всі ці процеси призводять до відмов виробів.

Узагальнена крива залежності інтенсивності відмов приладів мікро- і наноелектроніки від часу експлуатації показана на рис. 3.1. Вона відображає всі вищезрозглянуті процеси. На ній є три характерні ділянки.

Ділянка 1 тривалістю 100...500 годин (залежно від конструкції виробу) отримала в літературі назву *ділянки припрацювання*. На цій ділянці інтенсивність відмов з часом збільшується, досягає максимуму і потім зменшується до деякого сталого значення.

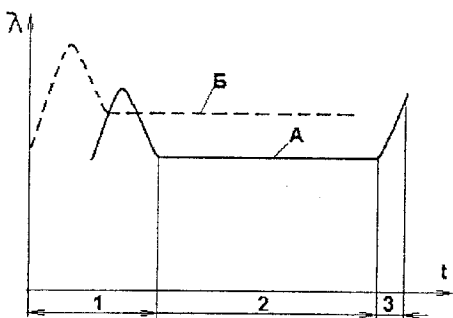


Рисунок 3.1 – Залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації

В період припрацювання t_n надійність, в першу чергу, визначається конструктивно-технологічними факторами, що призводять до підвищення ефективної інтенсивності відмов. На цій ділянці кривої інтенсивності відмов функція розподілу відмов добре описується розподілом Вейбулла при значенні коефіцієнта форми $m > 1$. На спадній ділянці кривої інтенсивності відмов кількість виробів з несприятливим сполученням недосконалоостей зменшується, тому зменшується і кількість відмов за одиницю часу. На цій ділянці також справедливий розподіл Вейбулла з коефіцієнтом $m < 1$.

У міру виявлення та усунення цих факторів надійність виробу доводиться до номінального рівня, який зберігається в тривалому періоді нормальної експлуатації. Ділянку 2 називають ділянкою нормальної роботи приладу. Протягом всієї ділянки інтенсивність відмов постійна і для опису характеристик надійності справедливий експоненціальний розподіл. Інтенсивність відмов в даний період вважається постійною $\lambda = const$.

Значний досвід експлуатації виробів показав, що в дійсності інтенсивність відмов на ділянці нормальної праці не залишається постійною, а поступово зменшується. Ця обставина говорить про те, що на цій ділянці з загальної кількості виробів в результаті відмов вилучаються вироби з відносно великими дефектами і несприятливим їх сполученням. Ті вироби, що залишилися справними, мають більш дрібні дефекти, отже, меншу здатність до відмов.

Неперервна випадкова величина – напрацювання системи до відмови – може описуватись різними законами розподілу залежно від властивостей системи і її елементів, умов роботи, характеру відмов та ін. Якщо невідомі дані про закон розподілу приладів мікро- та наноелектроніки, припускають експоненціальний розподіл часу роботи до відмови приладів. Для експоненціального розподілу показники надійності: ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, ймовірність відмов $Q(t)$, щільність ймовірності

напрацювання до відмови $f(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$ визначаються за виразами

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.1)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (3.2)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (3.3)$$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}. \quad (3.4)$$

Середній час напрацювання до відмови при $\lambda = \text{const}$ визначається як

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.5)$$

Якщо мікросхема пропрацює час $t = t_{cp}$, то ймовірність її безвідмовної роботи становить лише $P \approx 0,37$. Іншими словами, середнє напрацювання до відмови повинно бути набагато більшим за заданий час безвідмовної роботи мікросхеми. Наприклад, для напівпровідникової ІМС з заданим часом безвідмовної роботи $t = 105$ год (~ 10 років) та інтенсивністю відмов $\lambda = 10^{-7}$ год $^{-1}$ середній час напрацювання на відмову становить $t_{cp} = 10^7$ год, а ймовірність безвідмовної роботи $P = 0,99$. Інтенсивність відмов ІМС в даний час становить $\lambda = 10^{-7} - 10^{-8}$ год $^{-1}$. Для напівпровідникових біполярних і МДН-мікросхем вона приблизно однакова. Така ж надійність і сумішених мікросхем. Гібридні мікросхеми, порівняно з напівпровідниковими, мають меншу надійність, особливо ВГІС з навісними компонентами, що мають гнучкі дротяні виводи. Дещо вищою є надійність ВГІС, що містять компоненти з кульковими (стовпчиковими) або балочними виводами.

Для виробів з постійною інтенсивністю відмов як параметр надійності використовують також *гамма-відсоткове напрацювання* γ , оскільки його використовують для задання гарантованої довговічності. При постійній інтенсивності відмов ($\lambda = \text{const}$) гамма-відсоткове напрацювання γ пов'язано з інтенсивністю відмов таким чином

$$P(t) = e^{-\lambda t} = \gamma / 100. \quad (3.6)$$

З виразу 3.6 можна встановити залежність між обома параметрами надійності

$$\ln P(t_\gamma) = -\lambda t_\gamma,$$

$$t_\gamma = -\ln P(t_\gamma) / \lambda = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\gamma}{100} \right). \quad (3.7)$$

Для випадку, коли $\lambda(t) < 0,1$, що справедливо для більшості виробів електронної техніки, можна застосувати наближений вираз для $P(t_\gamma)$.

Розкладаючи вираз для $P(t_\gamma)$ в степеневий ряд і обмежуючись першими двома членами, отримаємо приблизне значення

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\lambda \cdot t_\gamma}{1!} + \dots \approx 1 - \lambda \cdot t_\gamma.$$

Звідки

$$t_\gamma = \frac{1 - P(t_\gamma)}{\lambda}. \quad (3.8)$$

Таким чином ми отримали спрощений вираз залежності між параметрами надійності.

Протягом експлуатації в об'єкті накопичуються прояви зносу і втомі, інтенсивність яких зростає із збільшенням строку експлуатації. Настає період інтенсивного зносу приладу, який закінчується з його приходом в граничний стан і зняттям з експлуатації. Це демонструється різким збільшенням інтенсивності відмов на ділянці 3, що виникає через втомлювальні явища в конструкційних матеріалах і настання стадії зносу виробу. Проте, ця стадія в напівпровідникових приладах тільки передбачається, тому що на практиці ні для одного з приладів, які експлуатуються в нормальних умовах, ця ділянка не спостерігається. На даній ділянці справедливий нормальний розподіл відмов.

Збільшення жорсткості режиму експлуатації викликає переміщення кривої інтенсивності відмов вгору по осі ординат і вліво по осі абсцис (крива Б на рис. 3.1). Це пов'язано з тим, що більш жорсткий режим експлуатації прискорює вихід з ладу виробів на ділянці припрацювання і час припрацювання скорочується, крім того, більш жорсткий режим експлуатації викликає зростання інтенсивності відмов на всіх ділянках кривої.

Наявність ділянки припрацювання на узагальненій кривій розподілу інтенсивності відмов ще раз підтверджує присутність в виробках, які пройшли вихідний контроль, відповідної кількості зразків з відносно великими дефектами, нерозпізнаними міжопераційними і заключними контрольними операціями.

Наявність такої фракції приладів в генеральній сукупності створює суттєві незручності для виготовлення апаратури, тому що, будучи вмонто-

ваними у відповідні блоки, вони призведуть до ранніх відмов апаратури. Вихід з цього може бути здійснений двома шляхами. Перший з них полягає в підвищенні діяльності контролю, який дозволив би виключати з сукупності виробів всі екземпляри з відносно великими дефектами і тим самим отримати однорідну продукцію, яка містить недосконалості, що не розрізняються апаратурою, наявною в розпорядженні сучасного виробництва. Проте, цей шлях може бути реалізованим та практиці тільки в розумних межах, тому що він пов'язаний з різким підвищенням вимог до вихідних матеріалів з використанням дуже складної і малопродуктивної контрольної апаратури, а також з суттєвим ускладненням технологічного процесу.

Виключна складність здійснення цього шляху призводить до значних матеріальних затрат, внаслідок чого виробництво приладів стає економічно недоцільним.

3.3 Оцінювання інтенсивності відмов приладів мікро- і напoeлектроніки

Для створення математичних моделей, що забезпечують кількісне оцінювання надійності ІМС за інтенсивністю відмов, використовуються дані, одержані як в результаті статистичних випробувань, так і в результаті вивчення механізмів виникнення відмов. Методи, що встановлюють причинний зв'язок між фізико-хімічними процесами в структурі ІМС і інтенсивністю відмов, потенційно є більш інформативними. Використовування таких методів дозволяє з високою точністю прогнозувати надійність ІМС, а також цілеспрямовано підвищувати її. Проте, зважаючи на велику кількість і складності процесів, які протікають в ІМС, побудова математичних моделей надійності на основі причинного підходу ускладнена. Тому для оцінювання надійності напівпровідникових мікросхем, що виготовляються за типовими технологічними процесами і мають високу повторюваність елементів структури (*p-n* переходи, діелектричні шівки, металізація), можливо використання комбінованих фізико-статистичних моделей. Для гібридних ІМС і МЗБ, що виготовляються на основі більшого різноманіття матеріалів, технологічних процесів та із застосуванням найрізноманітніших навісних компонентів, в даний час можливе застосування лише статистичних моделей.

Сумарна інтенсивність відмов $\lambda_{ІМС}$ складається із інтенсивностей відмов основних конструктивних елементів напівпровідникових ІМС:

$$\lambda_{ІМС} = \lambda_{КР} + \lambda_{КЗ} + \lambda_{ЗВ}, \quad (3.9)$$

де $\lambda_{КР}$ – інтенсивність відмов кристала з напівпровідниковими елементами ІМС;

λ_{K3} – інтенсивність відмов контактних з'єднань в межах кристала, тобто контактів металізації з напівпровідниковими областями;

λ_{3B} – інтенсивність відмов зовнішніх з'єднань кристала з выводами корпусу.

Інтенсивність відмов кристала розраховується з врахуванням впливу факторів конструктивного, виробничого та експлуатаційного характеру. Сюди ж умовно включається показник надійності корпусу, оскільки його негерметичність відбивається на стані поверхні кристала.

Таким чином, для кристала інтенсивність відмов оцінюється згідно з виразом

$$\lambda_{KP} = \lambda_{KPI} \cdot \alpha_{K1} \cdot \alpha_{K2} \cdot \alpha_{II} \cdot \alpha_C \cdot \alpha_M \cdot \alpha_T, \quad (3.10)$$

де λ_{KPI} – базова інтенсивність відмов;

α_{K1} – коефіцієнт, що враховує строгість технологічного контролю в процесі виробництва;

α_{K2} – коефіцієнт ненадійності корпусу;

α_{II} – коефіцієнт освоєності виробництва;

α_C – коефіцієнт складності кристала;

α_M – коефіцієнт, що враховує характер та інтенсивність механічного навантаження в процесі експлуатації ІМС;

α_T – температурний коефіцієнт.

Базова інтенсивність відмов становить величину приблизно

$$\lambda_{KPI} = 10^{-9} \text{ год}^{-1}. \quad (3.11)$$

Коефіцієнт строгості технологічного контролю визначається з табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта α_{K1}

Категорії контролю	α_{K1}
Суцільний неперервний контроль (вхідний, поопераційний, приймальний) матеріалів, напівфабрикатів, готових виробів	1
Вибірковий неперервний контроль	15
Вибірковий періодичний контроль	30

Надійність корпусу оцінюється залежно від його конструкції. Для металоскляних і металокерамічних корпусів при додатковій індивідуальній герметизації кристалів

$$\alpha_{K2} = 1 + 0,05 \cdot (N - 10), \quad (3.12)$$

де N – кількість виводів корпусу.

Якщо кристали, що встановлені на основу корпусу, не піддаються індивідуальній додатковій герметизації, то

$$\alpha_{K2} = 4 + 0,05 \cdot (N - 10). \quad (3.13)$$

Для полімерних корпусів

$$\alpha_{K2} = 6 + 0,05 \cdot (N - 10). \quad (3.14)$$

Вплив освоєності виробництва враховується коефіцієнтом α_{II} , який для першого року виробництва береться рівним 10, а для наступних років знижується до 1.

Складність кристала вважають залежною від його активної площі (тобто зайнятої елементами і між'єднаннями без врахування зовнішніх контактних площадок і технологічного поля по периферії кристала). Коефіцієнт складності розраховується за формулою

$$\alpha_C = 0,5 + 0,1 \cdot S, \quad (3.15)$$

де S – кількість одиниць (квадратних міліметрів) площі кристала.

Коефіцієнт механічного навантаження на кристал залежить від умов експлуатації і береться відповідно до даних таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнта α_M

Умови експлуатації	α_M
Стаціонарне наземне обладнання	2
Перевізне наземне обладнання	5
Переносне наземне обладнання і обладнання літаків	7
Обладнання ракет	10

Коефіцієнт α_T визначається залежно від температури елементів кристала відповідно до даних таблиці 3.4.

Інтенсивність відмов внутрішніх контактних з'єднань розраховується за формулою

$$\lambda_{KP} = \lambda_{K31} \cdot N_{K3}, \quad (3.16)$$

де λ_{K31} – інтенсивність відмов одного з'єднання;

N_{K3} – кількість з'єднань.

Таблиця 3.4 – Значення коефіцієнта α_T залежно від температури кристала

Температура елементів, С	25	60	80	100	125
Коефіцієнт α_T	1	2	3	4	5

Із врахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів інтенсивність відмов одного з'єднання можна подати таким чином

$$\lambda_{K3I} = \lambda_{K3I_0} \cdot \alpha_{K1} \cdot \alpha_{K2} \cdot \alpha_M \cdot \alpha_T, \quad (3.17)$$

де λ_{K3I_0} – базова інтенсивність відмов одного внутрішнього контактного з'єднання. Можна взяти $\lambda_{K3I_0} = 10^{-12}$ 1/(год·шт).

Інтенсивність відмов зовнішніх з'єднань розраховується аналогічно до внутрішніх

$$\lambda_{3B} = \lambda_{3B1} \cdot N_{3B}, \quad (3.18)$$

де λ_{3B1} – інтенсивність відмов одного з'єднання;

N_{3B} – кількість з'єднань.

Для одного з'єднання інтенсивність відмов дорівнює

$$\lambda_{3B1} = \lambda_{3B1_0} \cdot \alpha_{K1} \cdot \alpha_M. \quad (3.19)$$

Базова інтенсивність відмов одного зовнішнього з'єднання λ_{3B1_0} залежно від використовуваних матеріалів та технології береться відповідно до даних таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Базова інтенсивність відмов

Використовувані матеріали та технологія отримання	λ_{3B1_0} , 1/(год·шт)
Ультразвукове зварювання алюмінієвих провідників	$0,7 \cdot 10^{-9}$
Термокомпресія золотих провідників	$1,3 \cdot 10^{-9}$
Паяні з'єднання	$1 \cdot 10^{-9}$

Інтенсивність відмов ГІС та МЗБ подають у вигляді суми інтенсивностей відмов елементів, компонентів та з'єднань

$$\lambda_{ГІС} = \sum_{i=1}^{N_{МС}} \lambda_{МС_i} + \lambda_T \cdot N_T \cdot \alpha_T + \lambda_D \cdot N_D \cdot \alpha_D + \lambda_B \cdot N_B \cdot \alpha_B +$$

$$\begin{aligned}
& + \lambda_B \cdot N_B \cdot \alpha_B + \sum_{j=1}^{N_{\text{зап}}} \lambda_{\text{КОМП}} + \lambda_{\text{ЗДН}} \cdot [3N_T \cdot 2(N_D + N_R + N_C) + \\
& + N_{\text{ІМС}} \cdot n_{\text{ІМС}} + N_{\text{КОМП}} \cdot n_{\text{КОМП}}], \quad (3.20)
\end{aligned}$$

де $\lambda_{\text{ІМС}}, \lambda_T, \lambda_D, \lambda_R, \lambda_C, \lambda_{\text{КОМП}}, \lambda_{\text{ЗДН}}$ – інтенсивності відмов безкорпусних напівпровідникових ІМС, транзисторів, діодів, плівкових резисторів, конденсаторів, пасивних навісних компонентів та з'єднань, відповідно;

$N_{\text{ІМС}}, N_T, N_D, N_R, N_C, N_{\text{КОМП}}$ – кількість безкорпусних напівпровідникових ІМС, транзисторів, діодів, плівкових резисторів, конденсаторів та пасивних навісних компонентів, відповідно;

$n_{\text{ІМС}}, n_{\text{КОМП}}$ – кількість виводів безкорпусних напівпровідникових ІМС і пасивних навісних компонентів;

$\alpha_T, \alpha_D, \alpha_R, \alpha_C$ – коефіцієнти режиму роботи (температурні коефіцієнти) транзисторів, діодів, плівкових резисторів та конденсаторів, відповідно.

Для розрахунку рекомендується брати такі типові значення інтенсивностей відмов.

Таблиця 3.6 – Типові значення інтенсивностей відмов

Інтенсивність відмов	λ_T	λ_D	λ_R	λ_C	$\lambda_{\text{ЗДН}}$
Типові значення, год ⁻¹	10 ⁻⁸	0,6 · 10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	0,5 · 10 ⁻⁸	10 ⁻⁹

Інтенсивність відмов пасивних навісних компонентів залежить від типу компонента. Як приклад наведено значення в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Інтенсивність відмов навісних пасивних компонентів

Тип компонента	$\lambda_{\text{КОМП}}, \text{год}^{-1}$
Постійні резистори	10 ⁻⁸
Змінні резистори	10 ⁻⁷
Керамічні конденсатори	10 ⁻⁸
Електролітичні конденсатори	10 ⁻⁸
Мініатюрні котушки індуктивності	10 ⁻⁵

Коефіцієнти режиму роботи залежать від температури, їх рекомендовані значення наведено в таблиці 3.8. Як видно з таблиці, плівкові конденсатори мають знижену надійність при високій температурі. Це пояснюється прискоренням процесів міграції атомів обкладинок по мікрodefектах в діелектрику, що призводить до підвищення струмів витoku або до пробою.

Таблиця 3.8 – Значення коефіцієнтів режиму роботи

Коефіцієнт режиму	Температура, °С						
	20	30	40	50	60	70	80
α_T	1,0	1,35	1,85	2,6	3,60	4,9	6,2
α_D	1,0	1,27	1,68	2,0	2,60	3,4	4,1
α_R	1,0	1,15	1,40	1,95	2,80	3,5	4,4
α_C	1,0	1,26	1,71	2,20	2,35	5,7	12,4

3.4 Механізми відмов активних елементів

В практиці надійності використовуються два традиційних шляхи, в напрямку яких зосереджуються зусилля виробників і споживачів виробів електронної техніки. Один з них спрямований на вимірювання фактичної надійності виробів, необхідної для розрахунку надійнісних характеристик апаратури. Другий шлях пов'язаний з вдосконаленням виробів з метою підвищення їх надійності. Цьому шляху надається перевага, тому що знання причин надійності чи ненадійності, своєчасна розробка і прийняття необхідних заходів із збільшення надійності значно важливіші, ніж знання дійсного рівня його надійнісних характеристик. Ці обставини сприяли розвитку таких напрямків, як фізична надійність, фізика механізмів відмов, які спрямовані на вивчення механізмів відмов, на розробку методів внесення корекції в приладах і методів контролю дієвості внесених змін і вдосконалень.

Вивчення фізичних процесів механізмів відмов переслідує дві основні мети. Перша з них – за допомогою аналізу виробів, що відмовили, визначити причини відмов і вдосконалити на цій основі технологію виготовлення. Друга мета – через розкриття і пізнання явищ, які призводять до відмов, вдосконалення існуючих і створення нових моделей надійності приладів, які використовуються для контролю надійності нових і для прогнозування надійності приладів, які серійно випускаються.

Важливо підкреслити різницю між *видами* і *механізмами відмов*. *Вид відмови* – це очевидна подія, через яку проявляється несправна робота приладу. В ряді випадків вид відмови без дослідження внутрішньої структури приладу неможливо встановити. В цьому випадку маємо справу з так званою функціональною відмовою. *Механізм відмови* – це фізико-хімічний процес, що веде до відмови. З точки зору надійності недостатньо знати чи встановити, з яким видом відмов маємо справу. Значно важливіше з'ясувати причини, які призвели до відмови. Це основна мета аналізування відмов.

В напівпровідникових приладах та інтегральних мікросхемах з ідеальною структурою фізико-хімічні процеси за нормальних умов експлуатації повинні протікати з дуже малими швидкостями внаслідок того, що активні області знаходяться в нейтральному середовищі, ізольованому герметич-

ним корпусом від зовнішніх агресивних дій, а режими роботи далекі від критичних.

Розглянуті вище обставини були обґрунтуванням високої довговічності напівпровідникових приладів. Проте наявність дефектів і недосконалостей значно прискорює фізико-хімічні процеси при дії електромагнітних полів та механічних навантажень.

Розглянемо деякі механізми відмов, характерні для найбільш поширених напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.

Основними активними елементами є діоди, біполярні та польові транзистори з *p-n* переходом та ізольованим затвором. Відмови діодів і транзисторів, в основному, зумовлені процесами всередині та на поверхні пасивувального або підзатворного (в МДН-транзисторах) оксиду, відмовами металізації та контактів, забрудненнями, підвищеними струмами витікання *p-n* переходів.

В малопотужних логічних схемах, де розігрівання кристала незначне, підвищення температури корпусу мікросхеми від 293 до 398 К призводить до збільшення інтенсивності відмов транзисторів в 18 разів, а при $T = 473 \text{ }^\circ\text{C}$ в 50 разів.

Основними видами відмов активних елементів ІМС є обриви металізації і виводів, короткі замикання *p-n* переходів і вихід за встановлені норми електричних параметрів.

До поступових відмов відносяться перевищення допустимих зворотних струмів і пробивних напруг діодів, коефіцієнтів підсилення за струмом, пробивних напруг уніполярних транзисторів: порогові напруги, струми витоку, крутизна МДН-транзисторів. Причиною таких відмов найчастіше є вплив іонізованих домішок всередині і на поверхні пасивувального оксиду та вологи в корпусі. При наявності в кристалі кремнію підвищеного вмісту іонів швидкодифундувальних домішок Al, Se, Fe ці відмови викликаються також дифузійною домішок в об'єм активних елементів. Поступові відмови проявляються через зміни внутрішніх властивостей матеріалів (старіння).

Основними причинами повних відмов діодів і біполярних транзисторів є пробої *p-n* переходів і проплавлення металізації через дифузійні шари кремнію при високих рівнях розсіювальної потужності, електродифузія атомів кремнію в алюмінії при високих густинах струмів (порядку 10^{10} A/m), міграція алюмінію по поверхні кремнію між алюмінієвими контактними площинами за наявності різниці потенціалів і підвищених температур ($T > 423 \text{ K}$).

В ІМС переважають раптові відмови, зумовлені якістю виготовлення. При будь-якому рівні технологічного процесу збільшення кількості операцій призводить до зростання числа дефектів. Характерні відмови напівпровідникових приладів та ІМС можна розділити на такі види: обриви і короткі замикання металізації і виводів; короткі замикання *p-n* переходів; вихід електричних параметрів за межі встановлених допусків. Короткі за-

микання переходів в діодах і біполярних транзисторах виникають в результаті:

- пропалвлення металізації через дифузійні шари в кремнії при високих рівнях розсіювальних потужностей;
- електродифузії кремнію в алюміній при високих густинах струмів ($j \approx 10 \text{ А/м}^2$), з одночасним проникненням алюмінію в дифузійні шари;
- міграція алюмінію по поверхні кремнію між алюмінієвими контактними площинами та наявності різниці потенціалів і підвищених температур ($T \geq 423 \text{ К}$).

Пробой p - n переходів, в основному, зумовлені перевантаженнями за струмом і напругою. При пробоях виділяється велика кількість енергії, що призводить до перегрівання кристала аж до розплавлення металізації і проникнення металу через дифузійні шари в емітер і базу. В результаті має місце коротке замикання p - n переходів емітер-база і база-колектор. Асиметричні вольт-амперні характеристики p - n переходів вироджуються при цьому в прямі лінії з нахилом, рівним малому опору між замкнутими електродами.

Для ІМС з МДН-транзисторами найбільш характерні такі відмови: коротке замикання виток-затвор внаслідок пробоем діелектрика, розриви металізації на контактних площинах стоку через механічні деформації, корозію та пробой в кремнії між дифузійними областями витоку і стоку.

Поширені відмови ІМС, викликані явищами на поверхні кристала, – це накопичення в приповерхневій області напівпровідникової структури зарядів, які викликають значні зміни в стані електронно-діркових переходів, котрі зумовлюють появу приповерхневих каналів з інверсною провідністю.

Технологічний окисний шар забезпечує захист p - n переходу від дії навколишнього середовища, тобто є пасивувальним і стабілізуювальним покриттям.

Практика показує, що причини, які викликають поступові відмови, виявляються за високотемпературних випробувань при електричному навантаженні протягом 500...1000 год. Тому електротермотренування, яке використовується сьогодні, є універсальним засобом для відбракування потенційно ненадійних виробів з дефектами, що ведуть до раптових або поступових відмов.

3.5 Механізми відмов металізації та контактів

Механізми відмов металізації. Внутрішні міжелементні з'єднання активних структур напівпровідникових приладів та інтегральних схем виконують шляхом нанесення алюмінієвої плівки, товщиною близько 1 мкм, на поверхню кристала. В контактних вікнах вона взаємодіє з монокристалічним кремнієм p - або n -типу з різним ступенем легування, а на всій іншій поверхні вона контактує з двоокисом кремнію, як в площині поверхні схе-

ми, так і на сходинок окислу. Неминуча деформація металевої плівки на нерівностях поверхні схеми і в місцях приварювання дрітних контактів. В процесі експлуатації напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем металева розводка не меншою мірою, ніж активні елементи, зазнає струмових та теплових навантажень. Все це створює сприятливі умови для протікання різних процесів деградації металевої розводки, які призводять до зміни її початкових властивостей і в ряді випадків – до раптових відмов.

Основні види відмов металізації такі: обриви металізації внаслідок електроміграції металу і вигорання місць підвищеної густини струму, створених в місцях витончення металевої плівки при проходженні через сходинок окислу та при зміні конфігурації струмоведучих доріжок; обриви та короткі замикання, викликані електролітичною та хімічною корозіями алюмінію при неякісному захисному покритті і забрудненні поверхні кристала, короткі замикання металізації через отвори в окислі або через створення “місточків” між струмоведучими доріжками в процесі електролітичної корозії.

Причиною обривів металізації та виводів є перегорання, зумовлене пропусканням занадто великих струмів, викликаних короткими замиканнями в схемі. Дріт з алюмінію або золота діаметром $(2,5..3) \cdot 10^{-5}$ м розплавляється при густині струму, більшій за 10^8 А/м². При таких густинах струмів має місце перенесення матеріалу провідника з району негативного контакту до позитивного. Внаслідок цього створюються пустоти, які призводять до обриву металізації, а біля позитивного кінця – кристали, вуса і горбики. В біполярних транзисторах, які працюють в активному режимі, обрив, зумовлений електродифузією, має місце біля колекторної контактної доріжки, тому що з неї витікає потік електронів. При густинах струмів 10^{11} А/м² електродифузії іонів алюмінію прискорюється і відрив металевих доріжок від контактних площадок ІМС проходить за короткий час (декілька мілісекунд). Густина струму 10^{11} А/м² може виникати в момент пробою *p-n* переходу.

Явище електропереносу речовини в тонких металевих плівках має місце при проходженні як постійного, так і змінного струмів. Прискоренню електродифузії сприяють дефекти металевої плівки у вигляді подряпин, сторонніх включень, звужень металевих доріжок, нерівномірності по товщині плівки. Всі ці фактори створюють градієнт густини струму і температури, внаслідок чого і прискорюється електродифузія, кінцевим результатом якої є відмова приладу через розрив металізації.

Середнє напрацювання до відмови через обрив металізації, викликані електродифузією, визначають з виразу

$$t_{cp} = k j^{-n} \exp(E_a / kT), \quad (3.21)$$

де k – стала, яка залежить від матеріалу плівки, її структури та геометрії;

j – густина струму, $A \cdot cm^{-2}$;

n – показник степеня: рівний 1, коли відмова переважно визначається структурою плівки; у випадку, коли виникнення відмови переважно проходить за рахунок градієнта температури, $n = 3$;

E_a – енергія активізації процесу електродифузії, рівна 0,5... 0,7 еВ. При підвищених густинах струму надається перевага верхньому значенню енергії активізації.

Причиною відриву металевої розводки від контактних площадок активних елементів ІМС в пластмасовому корпусі є також електрохімічна корозія. Виникненню електрохімічної корозії сприяє проникнення вологи в герметизований корпус, адсорбція її на поверхні металізації через пори та тріщини в захисному покритті, а також наявність іонних забруднень на поверхні кристала. При досягненні відносної вологості всередині корпусу близько 60% створюються сприятливі умови для адсорбування на поверхні кристала достатньої кількості вологи, яка забезпечує високу електропровідність.

Поширеними механізмами відмов ІМС, пов'язаними з електрохімічною корозією, є волокнистість або дендритні нарощення металу, які визначаються електроміграцією матеріалу провідника. Нарощення матеріалу приводить до короткого замикання між сусідніми металевими смужками. Міграційні відкладення проходять за наявності води, різниці потенціалів між сусідніми провідниками та активації катодного електрода. Іони металу переносяться по плівці, яка створюється на поверхні ізолятора через наявність забруднень. В цьому процесі активну роль відіграють іони галогенідів.

Швидкість корозії суттєво залежить від напруги, яка подається на схему. Різниця потенціалів 5 В і більше достатня для того, щоб виникла інтенсивна корозія. Швидкість корозії залежить також від відстані між електродами, температури навколишнього середовища та концентрації іонів домішок на поверхні кристала. Аналіз відмов, що виникають внаслідок корозії, показує, що остання виникає і розвивається, в першу чергу, на межі зерен зі створенням суцільних мікротріщин, які призводять до розриву металізації. Використання фосфорсилікатного скла з підвищеною місткістю фосфору значно збільшує корозію, тому що надмірний фосфор, взаємодіючи з водою, створює фосфорну кислоту, яка підсилює корозію металізації. Зменшення вагової частини фосфору в фосфорсилікатному склі, яка контактує з алюмінієвою металізацією до 5%, збільшує середній наробіток до відмови через корозію більше, ніж на 3 порядки.

Крім електродифузії та електрохімічної корозії в ІМС діє механізм деградації металевих плівок, пов'язаних з окисненням алюмінію, що веде до збільшення омичного опору струмоведучих доріжок. Механізм відмов в

цьому випадку полягає у взаємодії кисню з поверхнею зерен в об'ємі матеріалу. Внаслідок зростання окисної плівки на поверхні провідникових доріжок і створення окисних міжзернових прошарків зменшується об'єм і ефективний поперечний переріз провідника і, як наслідок, збільшується питомий опір матеріалу. Це призводить до локальних перегрівів, підсилення електродифузії і зростання ймовірності відмов за рахунок обриву металізації.

Крім того, локальний перегрів сприяє збільшенню зерен полікристалічної структури за рахунок з'єднання сусідніх і розростання їх до поперечного розміру доріжок. В таких умовах проходить розрив або відшарування металізації через значні розтягувальні зусилля, що виникають в місцях зростання зерен. Дія цього механізму може бути значно послаблена за рахунок зниження густини струму, який тече по струмоведучих доріжках, а також доданням в металізацію спеціальних домішок, наприклад, ітрію до 1%, який підвищує температуру рекристалізації.

Поширеним видом відмов ІМС є *короткі замикання* металевої розводки на їх поверхні через отвори в окисній плівці. Причиною таких відмов є дефекти окислу (проколи, подряпини, тріщини), які знижують його діелектричну стійкість і виявляються тільки в процесі експлуатації.

На надійність ІМС впливає якість обробки поверхні структури, старанне промивання пластин. Неповне зняття продуктів травлення з поверхні кристала може призвести до розриву металізації при потраплянні вологи всередину корпусу готової мікросхеми.

Неохайність при розрізанні і розламуванні пластин на кристали може сприяти виникненню коротких замикань золотих провідників на вихідний кремній по краю кристала.

При роботі ІМС в її колах можуть протікати імпульсні струми. Виникнення короткочасних імпульсних струмів в ІМС може призвести до розриву провідників, тобто до відмов.

Імпульси струму тривалістю більше 10^{-4} с сприяють плавленню металізації на коротких ділянках з'єднань.

В плівках алюмінію на окисних пластинах кремнію при кімнатній температурі мають місце напруги розтягування порядку $(1-2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2)$, тому що температурні коефіцієнти лінійного розширення (ТКЛР) алюмінію та кремнію відрізняються майже на порядок $(3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1})$. Тому під час термоцикловання за температури від 213 до 378 К виникають розриви металізації на кристалах.

На завершення сформулюємо деякі рекомендації, спрямовані на зниження відмов внаслідок електродифузії в металізації та електролітичної корозії.

Насамперед необхідні заходи із *зниження густини струму*, який протікає по металевих доріжках. Це може бути досягнуто за рахунок вибору режиму і збільшення площі поперечного розрізу провідника, що краще робити за рахунок збільшення ширини доріжок. Хороший ефект дають захисні

покриття на провідних доріжках у вигляді різноманітного скла. Перешкоджаючи створенню горбиків і вусів, діелектричні покриття сприяють зниженню ймовірності відмов за рахунок електродифузії. Значна увага повинна бути звернута на якість самої металізації. Слід надавати перевагу великозернистим плівкам з орієнтацією зерен, яка сприяє зниженню ефекту електроміграції.

Ідеальним вирішенням проблеми усунення електроміграції було б створення металокристалічних або аморфних провідникових плівок. Можливість створення металізації з аморфною структурою більш реальна. Наприклад, сплави нікелю з ніобієм, молібденом, вольфрамом за відповідних умов дають аморфні структури. Основною перешкодою у використанні цих сплавів як вихідних матеріалів для металізації є відносно високий питомий опір плівок. Проте дуже низькі коефіцієнти дифузії домішок в таких сплавах вже зараз роблять перспективними їх використання як бар'єрного шару, який перешкоджає проникненню кремнію в міжелементні з'єднання при багатошаровій металізації.

З метою попередження відмов внаслідок електролітичної корозії необхідно встановити порогову концентрацію води в середовищі, що оточує мікросхему. При малій напрузі між провідниками (менше 0,2..0,4 В) і при дуже тонкій плівці води на поверхні кварцу іони не переносяться. Із зростанням вологості вище деякого порогу починається процес відкладання металу, який призводить до відмов.

Механізми відмов контактів. Неякісні з'єднання є одним з основних джерел відмов ІМС та напівпровідникових приладів і становлять більше 50% всіх відмов. Обриви виводів найчастіше виникають з двох причин:

- внаслідок зсувальних зусиль в місцях контактів, що виникають при коливаннях температури через різницю температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) виводів і захисного покриття безкорпусних ІМС з епоксидного компаунда, смоли та емалі;
- внаслідок режиму м'якого виводу біля контакту в процесі термокомпресії, що веде до звуження поперечного розрізу провідника, перегріву і розплавлення його при великих струмах.

Приєднання внутрішніх виводів із золотого дроту до контактних площадок на кристалі, зазвичай алюмінієвих, виконується термокомпресійним або ультразвуковим зварюванням при температурі підкладки близько 300 °С. В процесі термокомпресії проходить взаємна дифузія зварюваних металів, в результаті чого і створюється міцне з'єднання в місці контакту. Проте, одночасно з дифузією в місці контакту алюміній і золото вступають в хімічну реакцію зі створенням інтерметалевих сполук або інтерметалідів. Залежно від температури, тиску, концентрації золота та алюмінію в місці їх контакту можуть створюватись такі сполук, як $AuAl_2$, $AuAl$, Au_2Al , Au_4Al , Au_5Al , які суттєво відрізняються за питомим опором, коефіцієнтом термічного розширення та твердістю.

При температурах більше 300 °С утворюється надзвичайно пориста сполука, яку називають пурпуровою чумою. Цей різновид інтерметаліду найбільш небезпечний при формуванні термокомпресійного з'єднання.

Процес зниження міцності металевго контакту за рахунок створення інтерметалевих сполук посилюється ефектом Кіркондалла, суть якого полягає в тому, що при контакті різних металів в місці контакту проходить взаємна дифузія металів між вузлами або вакансіями. При цьому через різницю коефіцієнтів дифузії в метали з більшим коефіцієнтом дифузії створюються порожнини. У випадку контакту золото-алюміній, золото має більший коефіцієнт дифузії в алюміній і тому зі сторони золота утворюються порожнини.

Крім того, створення інтерметалевої сполуки і зміна її складу в процесі експлуатації призводить до виникнення значних механічних напруг на поверхні розподілу золото-алюміній внаслідок зміни об'єму та незбігу кристалічних ґраток різних інтерметалевих сполук. Механічні напруги по периферії термокомпресійного контакту золота з алюмінієм, а також різниця ТКЛР окремих сполук підсилює напруги, що може призвести до відриву золотого провідника від алюмінієвої контактної площадки.

3.6 Механізми відмов в результаті дії механічних навантажень та при дії радіації

Механізми відмов в результаті дії механічних навантажень. Пошкодження конструктивних елементів мікро- та наноелектронних приладів може мати місце при механічних діях, при навантаженнях, які викликають напруги, що перевищують механічну міцність матеріалу. Такі пошкодження можуть виникати при дії вібрації та удару, особливо в умовах резонансу. Проте пошкодження можуть настати при циклічних навантаженнях, коли напруги в елементах не перевищують технічної міцності матеріалів конструкції. Наприклад, поломка зовнішніх виводів корпусу приладу при багаторазових згинаннях відбувається в результаті накопичення пошкоджень; тому що при одноразовому згинанні границя технічної міцності матеріалу не перевищується.

Згідно з останніми підходами, руйнування матеріалу розглядається як поступовий термоактиваційний процес, що виникає в матеріалі з моменту прикладання до нього навантаження, меншого за критичне, і який розвивається в ньому з часом і з накопиченням дефектів аж до руйнування. Час t_3 , необхідний для розвитку процесу руйнування від моменту навантаження до настання розриву, називають часовою міцністю або довговічністю матеріалу. Численні експериментальні дослідження для багатьох твердих тіл підтвердили таку математичну залежність середнього часу до руйнування t_3 від прикладеної напруги σ і температури T .

$$t_3(\sigma, T) = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma T}{kT}}, \quad (3.22)$$

де τ_0 , U_0 , γ – сталі величини, залежні від природи і структури матеріалу, фізична суть яких стане ясною з подальших викладок;
 k – стала Больцмана.

Логарифмуючи (3.22), отримаємо

$$\ln t_3 = \ln \tau_0 + \frac{U_0 - \gamma T}{kT}. \quad (3.23)$$

На рис. 3.2 показано залежність $\ln t_3$ від σ . З рисунка видно, що ця залежність в вибраних координатах виражається прямими лініями, які сходяться в одній точці при значеннях $\tau_0 = 10 \div 12 \cdot 10^{-13}$ с. Для цієї точки справедливе рівняння $\gamma\sigma = U_0$. З підвищенням температури довговічність матеріалу зменшується і тим сильніше, чим вища температура. Експерименти показали, що розглянута залежність справедлива практично для всіх матеріалів. При цьому встановлено, що для металів U_0 за порядком величини добре збігається з енергією сублимації, а для полімерів – з енергією термічної деструкції. Стала τ_0 близька за величиною до періоду теплових коливань атомів в твердих тілах.

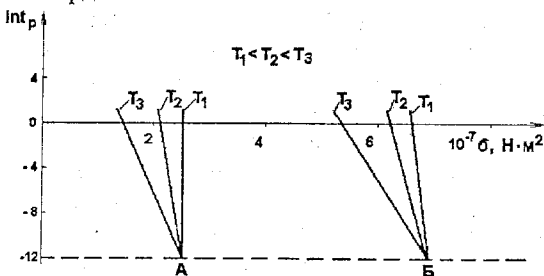


Рисунок 3.2 – Залежність часової міцності матеріалів А і В від напруги розтягування

Слід нагадати, що сублимація речовини являє собою перехід з твердого стану безпосередньо в газовий стан і для цього необхідно витратити деяку енергію, тому що для створення газу, який являє собою віддалені одна від одної частинки, необхідно переробити дію сил притягання, що зв'язують молекули в одному тілі.

Напруга σ , створена в твердому тілі, зменшує висоту потенційного бар'єра на величину $\gamma\sigma$ і, тим самим, збільшує ймовірність розриву

зв'язків та їх кількість в об'ємі. Створення субмікроскопічних областей з розірваними зв'язками та їх злиття призводить до зародження і розвитку тріщини.

Механізми відмов при дії радіації. Радіаційну стійкість приладів прийнято оцінювати за величиною зміни основних електричних параметрів при відповідному інтегральному потоці опромінення з встановленням меж, в яких прилад вважається придатним для подальшої експлуатації після радіаційної дії. При високих інтенсивностях опромінення допустима доза опромінення може бути досягнута за досить короткий час. При подальшій експлуатації приладу в звичайних умовах допускається, що він повністю зберігає роботоздатність. Проте, при дії радіації до дефектів і недосконаlostей, внесених при їх виготовленні, додаються радіаційні дефекти. Ці дефекти, взаємодіючи між собою, сприяють виникненню неблагоприємних ситуацій, які призводять до відмов. Можливість перебудови дефектів підтверджується експериментально при їх випалюванні. В процесі випалювання дефекти перебудовуються, можливо об'єднуються, внаслідок чого спад напруги не зменшується, а навпаки збільшується. Подібна ситуація можлива при експлуатації приладів після опромінення, коли прилад вважається придатним для роботи. Флуктуації в режимах використання можуть викликати перебудову дефектів і настання відмов значно швидше, ніж це могло б мати місце в приладах, які не піддавались опроміненню.

В пристроях пам'яті відносно великої ємності може мати місце збій типу "м'яка помилка", який полягає в зміні стану елементів пам'яті без створення стійких дефектів в структурі приладу. При цьому стан елемента пам'яті (0 або 1) відновлюється в динамічному запам'ятовувальному пристрої (ЗП) при черговому циклі регенерації, а в статичному ЗП – при пересуванні інформації. Встановлено, що більше 90% збоїв типу "м'яка помилка" в пристроях пам'яті викликається дією α -частинок (ядер гелію). Виявилось також, що в керамічних деталях корпусів, пластмасі, склі, золоті може міститись деяка кількість радіоактивних елементів, таких як U_{238} , U_{235} , Th_{232} , Zr_{91} , які можуть внаслідок α -розпаду випромінювати α -частинки з інтенсивністю від 0,004 до 45 см^{-2} з енергіями біля 8...9 МеВ.

В біполярних транзисторах на інтегральних мікросхемах дія α -частинок призводить до виникнення в p - n переходах високих рівнів іонізаційних струмів, пов'язаних з тим, що концентрація нерівноважних електронно-діркових пар, створених уздовж треку α -частинок, лежить в межах 10^{18} .. 10^{19} см^{-3} , що значно перевищує типові значення концентрації основних носіїв в епітаксіальних шарах і підкладці. Нерівноважний розподіл зарядів при іонізації сприяє створенню нестационарних електричних полів, впливаючих на процес збору нерівноважних носіїв p - n переходу. Цей механізм отримав назву ефекту створення ямок заряду. Суть цього механізму полягає в тому, що при пересіканні треком α -частинки p - n переходу заряд, який генерується в області треку, компенсує просторовий заряд p - n переходу на ділянці, яка пересікається треком. Прикладена до p - n переходу на-

пруга U_0 спадає на ефективній довжині треку L_a з відносним викривленням еквіпотенціальних ліній у вигляді ямки. Під дією електричного поля в ямці починають протікати процеси просторового розділення електронів та дірок. За рахунок виштовхувального електричного поля основні носії заряду викидаються в підкладку в радіальному напрямку. Неосновні носії під дією поздовжньої складової електричного поля спрямовуються до поверхні p - n переходу. Особливістю біполярних ІМС є наявність в них паразитних n - p - n - p (тиристорних) структур. Іонізаційні струми, які виникають в p - n переходах, під дією високоенергетичних частинок у відповідних умовах призводять до ефекту замикання, при якому шкідливий тиристор, який є в схемі, перемикається в провідний стан. Внаслідок дії ефекту замикання схема припиняє функціонування за прямим призначенням. Для відновлення роботоздатності схеми необхідно відключити живлення, щоб перевести шкідливу тиристорну структуру в початковий стан.

Задачі для розв'язування

Задача 3.1 Час роботи елемента до відмови підлягає експоненціальному закону розподілу з параметром $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності елемента $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ та t_{cp} для $t = 1000$ год.

Задача 3.2 Обчислити показники надійності елемента з експоненціальним розподілом часу роботи до відмови, якщо $\lambda = 4,6 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $t = 2000$ год.

Задача 3.3 Два з трьох пристроїв системи, що проектується, мають $\lambda_1 = 0,008$ год⁻¹ і $\lambda_2 = 0,032$ год⁻¹. Яка інтенсивність відмов повинна бути у третього пристрою, щоб система мала ймовірність безвідмовної роботи за 1 годину $P(1) = 0,95$.

Задача 3.4 Визначити ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов мікроелектронного приладу при $t = 1300$ год роботи, якщо при випробуваннях отримано значення середнього часу безвідмовної роботи 1500 год. Справедливий експоненціальний закон.

Задача 3.5 Відповідно до протоколу ресурсних випробувань мікроелектронних виробів (табл. 3.8) розрахувати $\lambda(t)$ та побудувати графік функції. Визначити середню інтенсивність відмов та гамма-90% напрацювання.

Таблиця 3.8 – Витяг з протоколу ресурсних випробувань мікроелектронних приладів

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N=50 шт.	t_i , тис. год	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88
	$n(\Delta t)$, шт.	4	2	1	0	1	0	1	1	0	1

Задача 3.6 Визначити гамма-90% напрацювання мікроелектронного приладу, середній час безвідмовної роботи якого 1850 год, якщо справедливим є експоненціальний закон.

Задача 3.7 Випробовувалось 100 однотипних елементів на визначення часу роботи до відмови. Результати фіксувалися через кожні 100 годин. Число відмов за кожен розглянутий інтервал наведено в таблиці. Необхідно визначити інтенсивність відмов $\lambda(t)$ та частоту відмов $f(t)$ для кожного інтервалу.

Таблиця 3.9 – Результати відмов досліджуваних елементів

t , год	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700
Число відмов	0	7	15	33	40	3	2

Контрольні запитання

1. Як поділяються відмови приладів мікро- і наноелектроніки за характером виникнення?
2. Як поділяються відмови приладів мікро- і наноелектроніки за причиною виникнення?
3. Як визначаються показники надійності для експоненціального закону розподілу?
4. Як визначається сумарна інтенсивність відмов ІМС?
5. В чому полягає відмінність між видами відмов та механізмами відмов?
6. Назвіть основні види відмов металізації.
7. Розкажіть про причини відмов контактів мікроелектронних приладів.
8. Дайте означення гамма-відсоткового напрацювання до відмови.
9. Чим обумовлені високі значення інтенсивності відмов приладів мікро- і наноелектроніки в період початкового припрацювання?
10. Чим обумовлені високі значення інтенсивності відмов приладів мікро- і наноелектроніки в період зносу?

4 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

4.1 Підвищення надійності шляхом вилучення потенційно ненадійних виробів

У багатьох приладах мікро- та наноелектроніки на початку експлуатації спостерігається підвищена інтенсивність відмов за рахунок прихованих грубих виробничих дефектів. Часто причинами таких відмов є дефекти в області $p-n$ переходів: шкідливі домішки (забруднення), мікротріщини тощо. Ці дефекти в процесі експлуатації досить швидко розвиваються і призводять до відмов. Дослідження показують, що прилади мікро- та наноелектроніки з такими дефектами мають підвищений рівень шумів за рахунок розсіяння носіїв струму на дефектах. Шуми можуть виникати не тільки завдяки дефектам активних шарів, але і на неякісних омичних контактах, які є також грубими виробничими дефектами і також призводять до відмов на ранніх стадіях експлуатації.

Шуми, що виникають внаслідок розсіяння на дефектах, відрізняються від білого шуму обмеженістю спектра: верхня границя діапазону частот не перевищує 1000 Гц. Це використовується з метою підвищення інформативності показника шляхом обмеження смуги вимірювача шумів.

Таким чином, фіксуючи низькочастотну складову шуму, є можливість виявити потенційно ненадійні вироби. З цією метою спочатку визначають верхню границю низькочастотних шумів за частотою. Для цього відбирають вироби з підвищеним рівнем шумів та спостерігають у них спектр шуму. Низькочастотні шуми спостерігаються у вигляді підвищеної амплітуди в низькочастотній області. Тут визначають верхню границю за частотою ділянки з підвищеною амплітудою, виготовляють підсилювач зі смугою пропускання від нуля до визначеної верхньої границі спектра.

Далі визначають нижню границю амплітуди низькочастотних шумів, які повинні свідчити про потенційну ненадійність виробів. З цією метою відбирають вироби з низькочастотними шумами і випробовують їх на надійність впродовж відносно невеликого проміжку часу. За результатами випробувань складають кореляційну діаграму. Якщо спостерігається залежність між амплітудою шумів і часом напрацювання до відмови, то нижня границя амплітуди шуму, з якої порушується кореляція, і є шуканою границею.

Прилад, за допомогою якого виконують дослідження, а потім і вилучення потенційно ненадійних виробів, складається із смугового підсилювача зі смугою пропускання, що відповідає смузі низькочастотних шумів, до входу якого підключається випробовуваний мікроелектронний прилад, а до виходу – мілівольметр змінного струму. Крім цього до складу приладу входить блок режимів, що забезпечує режими випробовуваного мікроелектронного приладу за постійним струмом. При виконанні технологічної

операції у виготовлених виробів контролюють рівень низькочастотних шумів з вилученням екземплярів, у яких рівень шумів перевищує встановлений.

Для вирішення проблеми підвищення надійності мікроелектронних приладів шляхом вилучення екземплярів з підвищеним рівнем низькочастотних шумів необхідно встановити кореляційну залежність між рівнем шумів і надійністю виробу, що оцінюється часом напрацювання до відмови. З цією метою з якоїсь сукупності виготовлених виробів N відбираються екземпляри з підвищеним рівнем низькочастотних шумів n , які встановлюють на випробування з надійності, як правило, в прискореному режимі на термін до відмови деякої частини з них $n_{вш}$. Якраз для цих виробів встановлюється кореляційна залежність, яка може бути нелінійною.

Далі необхідно обчислити коефіцієнт кореляції і встановити значимість його величини, оскільки навіть за відсутності кореляції коефіцієнт кореляції може відрізнитись від нуля за рахунок обмеженості обсягу даних. Коефіцієнт кореляції визначається для кожної з виділених груп за виразом:

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\bar{U}_{шj} - U_{шi})(\bar{t}_{Hj} - t_{Hi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_j} (\bar{U}_{шj} - U_{шi})^2 \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{t}_{Hj} - t_{Hi})^2}}, \quad (4.1)$$

де j – номер виділеної групи;

i – номер виробу в групі;

$U_{шi}$ – рівень шумів i -го виробу;

t_{Hi} – напрацювання до відмови i -го виробу;

n_j – кількість виробів в j -ій групі;

$\bar{U}_{шj}$ – середнє арифметичне рівня шуму в j -ій групі, визначається як

$$\bar{U}_{шj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} U_{шi}}{n_j}, \quad (4.2)$$

\bar{t}_{Hj} – середнє арифметичне часу напрацювання в j -ій групі

$$\bar{t}_{Hj} = \frac{\sum_{i=1}^j t_{Hi}}{n_j}. \quad (4.3)$$

Для визначення значимості отриманих коефіцієнтів необхідно порівняти їх з граничними значеннями: якщо обчислений коефіцієнт не менший за граничне значення, то кореляція існує, в іншому ж випадку кореляційна залежність відсутня. Нижче наводиться фрагмент таблиці 4.1 граничних значень для порівняння з похибкою не більше 5%.

Таблиця 4.1 – Граничні значення коефіцієнта кореляції

n_i	5	6	7	8	9	10	11	12	13
r_i	0,878	0,811	0,754	0,707	0,666	0,632	0,602	0,575	0,553

Під час технологічного процесу вилучаються вироби, шум яких перевищує допустиме значення.

Для остаточного вирішення необхідності запровадження технологічної операції вилучення потенційно ненадійних виробів необхідно оцінити ступінь збільшення надійності від цього заходу. З цією метою обчислюється середня інтенсивність відмов впродовж гарантованого строку служби, оскільки фактична інтенсивність відмов також визначається за цей термін, тобто

$$\lambda_{C_i} = \frac{n_B - n_{ВШ}}{(N - n) t_G}, \quad (4.4)$$

де t_G – гарантований строк служби;

$n_{ВШ}$ – кількість виробів, що відмовили внаслідок наявності підвищеного рівня шуму;

n_B визначається як

$$n_B = N \cdot \lambda_{C_i} \cdot t_G, \quad (4.5)$$

де λ_{C_i} – середня інтенсивність відмов до впровадження вилучення потенційно ненадійних виробів.

Будемо вважати, що всі потенційно ненадійні вироби відмовили під час випробувань $n_{ВШ} = n$.

4.2 Підвищення надійності методом резервування

Для підвищення надійності складних технічних систем все частіше застосовують метод апаратної надлишковості або *резервування (backuping)*: на випадок відмови якогось елемента чи пристрою системи його функції виконує введений в систему аналогічний елемент чи пристрій. При розробці мікроелектронних приладів такий метод найчастіше використовують для підвищення надійності ІМС.

З точки зору надійності всі елементи можуть бути об'єднані в систему одним з трьох способів: послідовним, паралельним або послідовно-паралельним.

Послідовною називається така схема (рисунок 4.1, а) з'єднання елементів, при якій відмова будь-якого елемента викликає втрату робоздатності всієї системи. При *паралельній* схемі (рисунок 4.1, б) з'єднання функціонування окремого елемента не залежить від стану інших, а відмова системи настає при відмові всіх елементів. І, нарешті, *послідовно-паралельна* схема (рисунок 4.1, в) передбачає комбінацію двох попередніх варіантів.

Більшість радіоелектронних систем складається з послідовно-паралельної схеми з'єднаних елементів, в якій вихід з ладу однієї з деталей не приведе до відмови всієї системи.

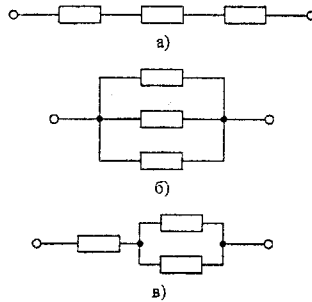


Рисунок 4.1 – Схема з'єднання елементів системи

На практиці для опису структури систем поряд із структурними схемами часто використовують також *структурні формули*. Для цього всім елементам або їх групам, з'єднаним на структурній схемі послідовно, присвоюють власні номери від 1 до n . Якщо ж два або більше однакових з точки зору надійності елементів системи з'єднані на структурній схемі паралельно, то всі вони одержують однаковий порядковий номер. Номери елементів, з'єднаних послідовно, розділяють знаком "дефіс", а елементів, з'єднаних паралельно – "похилою дробовою рисою". Так, наприклад, для структурної схеми, що зображена на рис. 4.2, а, структурна формула має вигляд $1/1/1-2-3/3-4-5$, а структурній формулі $1-2/2-3/3-4-5/5$ відповідає схема, що зображена на рис. 4.2, б.

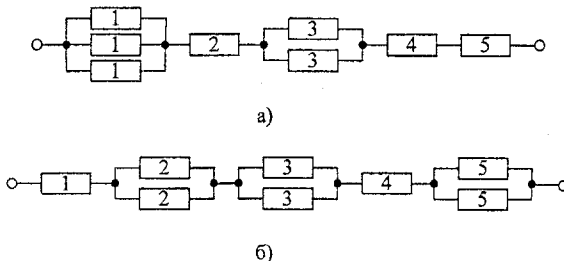


Рисунок 4.2 – Приклади структурних схем складних систем

При розрахунку схемної надійності складної системи необхідно мати дані про надійність кожного елемента. Якщо, наприклад, для n послідовно з'єднаних елементів системи ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t дорівнює відповідно $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t) \dots P_n(t)$, то ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнюватиме:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod P_i(t), \quad (4.6)$$

а ймовірність відмови відповідно

$$Q(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod Q_i(t). \quad (4.7)$$

При однаковій надійності всіх n елементів формула (4.6) набуває більш простого вигляду

$$P(t) = [P_i(t)]^n. \quad (4.8)$$

Зокрема, якщо вихід з ладу окремих елементів системи пов'язаний тільки з раптовими відмовами, тобто надійність елементів підлягає експоненціальному закону, то вирази для ймовірності безвідмовної роботи елемента і системи можна переписати у такому вигляді:

$$P_i(t) = \exp[-\lambda_i t], \quad (4.9)$$

$$P(t) = \prod \exp[-\lambda_i t] = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \cdot t] = \exp[-\lambda_0 t], \quad (4.10)$$

де $\lambda_0 = \sum \lambda_i$ – інтенсивність відмов системи, надійність якої теж підлягає експоненціальному закону.

Наведені рівняння свідчать про те, що навіть системи, складені з високонадійних елементів, можуть мати низьку надійність. Наприклад, якщо система складається з 50-и елементів, ймовірність безвідмовної роботи яких протягом часу t становить $P_i(t) = 0,99$, то ймовірність безвідмовної роботи системи в цілому становитиме $P_i(t) = (0,99)^{50} = 0,55$. Якщо ж кількість елементів системи зростає до 500, то вона стане практично роботоздатною ($P(t) = 0,01$).

Така ситуація звела б до нуля можливість технічного прогресу, оскільки кожен новостворений технічний об'єкт, маючи, як правило, складнішу структуру, ніж його попередники, мав би, одночасно, і нижчу надійність. Однак, як відомо, окрім послідовного з'єднання елементів в системі, можливе ще й паралельне їх з'єднання, тобто дублювання або резервування елементів системи.

Резервування – це введення в систему додаткових елементів, які виконують ті ж функції, що й основні, і є надлишковими відносно мінімально необхідної структури об'єкта. Метою резервування є збереження роботоздатного стану об'єкта при відмові одного або кількох елементів.

Дублювання – це резервування, при якому кількість додаткових елементів дорівнює кількості основних.

Державний стандарт України передбачає такі види резервування:

- *структурне* – із застосуванням резервних елементів структури об'єкта;

- *часове* – з врахуванням резервів часу;

- *інформаційне* – із застосуванням резервів інформації;

- *функціональне* – із застосуванням функціонального резерву;

- *навантажувальне* – із застосуванням резерву навантаження;

- *загальне* – при якому резервують об'єкт в цілому;

- *роздільне* – при якому резервують окремі елементи або їх групи;

- *постійне* – при якому після відмови елемента зміна структури не відбувається;

- *динамічне* – при якому після відмови елемента можлива зміна структури об'єкта;

- *заміщенням* – динамічне резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного;

- *ковзним* – резервування заміщенням, при якому група основних елементів резервується одним або кількома додатковими, кожен з яких може замінити будь-який основний елемент даної групи;

- *змішане* – поєднання різних видів резервування одного й того ж об'єкта;

- *дублювання* – резервування з кратністю резерву до одного.

При резервуванні показники надійності системи (машини, агрегата, складальної одиниці) можуть бути вищими, ніж відповідні показники будь-якого її елемента. Таким чином, існує можливість створення надійних систем з ненадійних елементів.

Нехай, наприклад, n паралельно з'єднаних елементів системи мають ймовірність відмови протягом часу t відповідно $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$... $Q_n(t)$. Тоді ймовірність відмови системи дорівнюватиме

$$Q(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod Q_i(t), \quad (4.11)$$

а ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod Q_i(t). \quad (4.12)$$

При однаковій надійності всіх n елементів формула (7) набуває простішого вигляду:

$$Q(t) = (Q_i(t))^n. \quad (4.13)$$

Таким чином, в системах з послідовно з'єднаними елементами ймовірність безвідмовної роботи визначають перемножуванням ймовірностей безвідмовної роботи елементів, а в системах з паралельним з'єднанням — ймовірність відмови визначають перемножуванням ймовірностей відмови елементів.

Якщо в системі n елементів не дубльовані, а m елементів — дубльовані, то ймовірність безвідмовної роботи системи протягом часу t визначається з такого виразу

$$P(t) = P_n(t) \cdot P_m(t), \quad (4.14)$$

де $P_n(t) = \prod P_i(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи недубльованих елементів;

$P_m(t) = \prod [1 - Q_i^2(t)]$ — ймовірність безвідмовної роботи дубльованих елементів.

З метою підвищення надійності систем на практиці часто застосовують резервування (заміщення) з відновленням. В цьому випадку за відмови основного елемента його заміщає резервний, а основний підлягає відновленню (ремонті або заміні), після чого стає в резерв. У окремому випадку дублювання з відновленням відмова пари (основний елемент = дублер) настає тоді, коли під час відновлення одного з елементів відмовить інший.

Нехай розподіл відмов підлягає експоненціальному закону, λ — інтенсивність відмов основного елемента, t_p — тривалість відновлення резервного елемента, \bar{t}_p — середня тривалість відновлення. Тоді ймовірність безвідмовної роботи такої пари протягом часу експлуатації t становитиме

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_o}\right), \quad (4.15)$$

де

$$T_o = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p) \cdot \bar{t}_p} \right].$$

Якщо взяти, що $\lambda_p = \lambda$, то

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} + \frac{0.5}{\lambda^2 \cdot t_p} \quad (4.16)$$

Резервування заміщенням інакше називають ще *холодним*, оскільки резервні елементи до моменту відмови основного не працюють, а отже, їх відмова в цей період часу є неможливою. *Гаряче* резервування – коли і основний, і додаткові елементи вступають в роботу одночасно.

Проміжне місце між *гарячим та холодним* займає *полегшений резерв*, у випадку якого резервний елемент до моменту відмови основного працює в полегшеному режимі і тому ймовірність його відмови в цей період часу мала.

4.3 Підвищення надійності шляхом технологічного тренування

ІС при експлуатації характеризується кривою залежності інтенсивності відмов $\lambda(t)$ від часу (див. рис. 3.1). На даній кривій видно відносно високе значення λ в період ранніх відмов (період припрацювання), порівняно низьке і постійне значення в період експлуатації і зростаюча інтенсивність в період зносу (приблизно через 25 – 30 років нормальної роботи). Ранні відмови виникають, як правило, внаслідок конструктивних і технологічних недоліків. У нормальних умовах роботи цей період триває до 1000 год або приблизно шість тижнів. На закінчення цього етапу вказує вирівнювання кривої інтенсивності відмов. Інтенсивність відмов в період напрацювання має тенденцію до зменшення із удосконаленням конструкції і технології.

В даний час загальноприйнятими вважаються два напрямки збільшення надійності ІМС:

- усунення причин відмов за рахунок вдосконалення конструкції та технології виготовлення, тобто впливу на процес виробництва за допомогою зворотного зв'язку (передачі інформації), і створення в кінцевому рахунку бездефектної технології;

- виявлення і видалення виробів з відмовами (дійсними та потенційними) з готової партії до поставки споживачеві.

Найбільш ефективним методом підвищення якості та надійності в ІМС є перший.

Оскільки відмови можливі навіть при добре освоєному виробництві, поширеним способом підвищення якості та надійності партій ІС (а не конкретних схем) є проведення відбракувальних випробувань в процесі вихідного контролю цих партій на заводі-виробнику.

Тренування – це метод відбракування, при якому ІМС змушують працювати певний час в певних умовах навколишнього середовища з подачею або без подачі електричного навантаження, розрахованого таким чином, щоб в процесі тренування викликати відмову потенційно ненадійних схем, не пошкоджуючи надійні. Тренування фактично прискорює ста-

ріння ІМС і призначається для «випалювання» раних відмов, тобто для відбракування потенційно ненадійних ІМС та покращення надійності партії схем. Отже, ІМС, які витримали тренування, будуть мати більш низьку і постійну частоту відмов, що значно підвищує надійність виробів мікро- та наноелектроніки, в яких ці ІМС використовуються. Зрозуміло, тренування ІМС дає позитивні результати лише в тому випадку, коли до і після нього проводиться контроль електричних параметрів.

Під тренуванням розуміються всі види *електротренувань (ЕТ)*, *електротермотренувань (ЕТТ)* і *термотренувань (ТТ)*. Кожен з перелічених видів тренувань має свої переваги і недоліки, тому необхідним є проведення роботи за вибором виду тренування, його режиму для конкретного типу ІМС. Перш за все необхідно домогтися, щоб при проведенні тренування ІМС за вибраною методикою виявлялося не менше 95% потенційно ненадійних виробів. Дана величина достовірності результатів тренування вважається нормальною і зафіксована військовим стандартом США MIL-STD-883.

Електротренування ІМС, чи випробування на примусову відмову, є ефективним і в той же час дорогим методом та проводиться з метою відбракування виробів, що мають внутрішні дефекти або дефекти, пов'язані з відхиленнями в технологізації процесів, які можуть викликати подальші відмови, залежні від часу і навантаження. Мета ЕТ – забезпечити навантаження, рівне або дещо менше максимально допустимого при експлуатації, або забезпечити такі еквівалентні умови випробувань, які дозволили б за короткий час виявити максимальне число потенційно ненадійних виробів у випробовуваній партії.

ЕТ ІС може проводитися різними методами в таких режимах: статичному із зворотним зміщенням переходів; статичному з прямим зміщенням переходів; динамічному з послідовним або паралельним збудженням кільцевого генератора; в режимі увімкнено / вимкнено. Тренування МОН ІС, в яких можливі поверхневі дефекти, виконується в режимі зворотного зсуву. Логічні ІС зазвичай тренуються в режимі, коли всі схеми перемикаються з великою швидкістю, для цього застосовується збудження від зовнішнього програмованого пристрою. Можна також з'єднати логічні ІС в групи за кільцевою схемою з відповідним числом (парних або непарних) схем в кожному колі для того, щоб забезпечити позитивний зворотний зв'язок. Вибір між статичним і динамічним режимами тренування часто викликає труднощі, оскільки кожен з них має переваги і недоліки в прискоренні спрацювання механізмів відмов. Прояв дефектів в МОН ІС через іонні забруднення кристала найефективніше прискорюється високою температурою і постійною напругою з полярністю, яка сприяє переміщенню зарядів до границі Si-SiO₂. Динамічне зміщення створює потрібну полярність напруги тільки протягом частини динамічного циклу, тоді як під час решти частини циклу може відбуватися зворотний перерозподіл заряду.

Електротермотренування. Спрацьовування механізмів відмов ІМС в більшості випадків прискорюється під дією температури і напруги або струму, тому в процесі тренування ІМС повинні працювати при максимально допустимій напрузі і максимально можливій температурі. Однак при цій температурі не повинно бути теплового перевантаження, змін логічних станів, а також недопустимо великої густини струму в металізації.

ЕТТ є ефективним засобом прискорення спрацьовування експлуатаційних механізмів відмов. Воно дає багато інформації за короткий час, але достовірні результати можна отримати на основі правильного вибору електричних і теплових навантажень, виявлення видів і механізмів відмов, відповідних початковим умовам експлуатації, а також статистичної обробки отриманих результатів. Методи ЕТТ можуть використовуватися ті ж, що і для ЕТ, плюс зовнішній вплив підвищеної температури. Температури, при яких проводяться тренування, становлять 55, 70, 85, 100, 125 і 150 °С. ЕТТ проводиться на спеціальних стендах при строгому контролі за температурою.

Ефективність ЕТТ складних ВІС залежить від використовуваних кіл збудження і навантаження, а також від температури і тривалості процесу тренування. Щодо порівняльної ефективності динамічного і статичного режимів випробовування МОН ВІС немає єдиної точки зору. ЕТТ в статичному режимі сприяє виявленню ІС з дефектами поверхні, які проявляються у вигляді струмів витоків або зменшення швидкодії. ЕТТ в динамічному режимі виявляє дефекти комірок запам'ятовувальних пристроїв (ЗП) на МОН-транзисторах, що обумовлені поганою якістю виготовлення. ЕТТ різні фірми проводять при більш високих температурах (до 300 °С), вважаючи, що при підвищених температурах постійне значення інтенсивності відмов досягається протягом більш короткого часу, ніж при більш низьких температурах. Встановлено, що в процесі відбракування ІС тридцятигодинне тренування при температурі 150 °С еквівалентне режиму тренування протягом 168 год при температурі 125 °С. Однак слід враховувати, що при підвищених температурах можуть виникати пошкодження, зумовлені великими неконтрольованими внутрішніми струмами або іншими причинами, які не піддаються контролю при тренуванні з високими температурами.

Високотемпературне старіння. Відомо, що деякі недосконалості конструкції і порушення технології при виготовленні ІМС можуть проявлятися при випробуваннях на зберігання, як при підвищених, так і при знижених температурах. При підвищених температурах прискорюється дифузія домішок і зарядів на поверхні напівпровідника, збільшується рухливість іонів в оксиді, підвищується волого- і газовиділення частинами виробів, прискорюється процес старіння сплавів, краще виявляються механічні напруги. При знижених температурах з'являється вплив термічних напруг на спаї і на *p-n* переходи ІМС. Дослідження показують, що якщо відсоток відмов ІС

після ЕТТ становить частки відсотка, то ЕТТ з великою достовірністю (0,9) може бути замінено на *термотренування*.

Різновидом тренування можна вважати *високотемпературне старіння* (зберігання, метод 1008 MIL-STD-883). Вважається, що випробування при температурах $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1000 год (метод 1005, 1006 MIL-STD-883) дають зазвичай лише інформацію про частку забракованих ІМС в партії. Такі випробування не дають інформації ні про механізми відмов, ні про їх розподіл, ні про їх коефіцієнт прискорення. Найбільш поширеними є випробування ІМС на довговічність при температурах, фізично допустимих конструкцією ІМС без подачі електричного навантаження тривалістю 48–100 год і більше, виходячи з припущення, що при цих навантаженнях діють ті ж самі механізми відмов, що і за нормальних умов експлуатації. Завдання таких випробувань полягає в тому, щоб за невеликий час виключити потенційно ненадійні ІМС. Високотемпературне старіння, що проводиться при температурі $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, здатне виявити протягом декількох годин такі зміни в елементах конструкції схем, які, насамкінець, відбулися б в них при тривалій роботі (можливо, протягом декількох десятків років) в нормальних умовах. При таких порогових температурах ($200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$) можна спостерігати механізми відмов, що рідко проявляються при помірній температурі. Однак у цьому випадку відбувається швидка витрата міцності конструкції схеми.

Інтенсивність відмов КМОН ІС при високотемпературному старінні показана на рис. 4.3. Типовий розподіл часу до настання відмови має бімодальний характер. Енергія активації механізмів відмови для ІС основної частини вибірки оцінюється величиною $1,3\text{ еВ}$, а для аномальних ІС, як правило, не перевищує $0,9\text{ еВ}$.

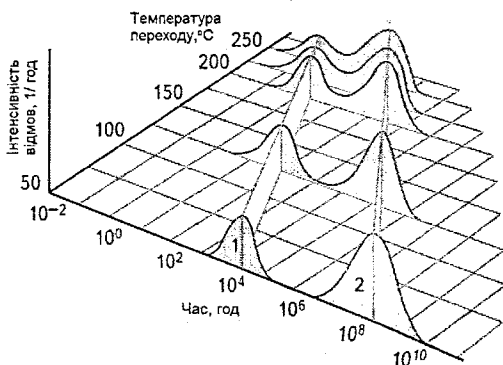


Рисунок 4.3 – Інтенсивність відмов КМОН ІС при високотемпературному старінні:

1 – розподіли для аномальних ІС;

2 – розподіли для основної частини вибірки

Під дією підвищеної температури під час тренувань спостерігається прискорений розвиток прихованих дефектів. Дослідження показують, що швидкість розвитку дефектів відповідає закону Ареніуса

$$V_p = A \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\}, \quad (4.17)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від виду дефектів;

E_a – енергія активації дефекту;

k – стала Больцмана;

T – температура за шкалою Кельвіна.

Як видно з цього виразу, швидкість зростає при підвищенні температури. Але при значному підвищенні температури спостерігаються нові пошкодження, тобто виникають нові дефекти. Тому необхідно відшукати таку максимальну температуру тренування, при якій ще не виникають пошкодження. Ознакою виникнення пошкоджень буде відхилення відмов від закономірності Ареніуса.

Для запровадження операції технологічного тренування необхідно також встановити час тренування, який буде в K_{np} разів менший за час підвищеної інтенсивності відмов. Тут K_{np} – коефіцієнт прискорення випробувань, який визначається за результатами випробувань вибірок виробу при різних температурах. Середній час напрацювання до відмови виробів, що відмовили при цьому, повинен зменшуватись пропорційно збільшенню коефіцієнта прискорення для даної температури:

$$K_{np} = \frac{\tau_{н0}}{\tau_{nt}}, \quad (4.18)$$

де $\tau_{н0}$ – середній час напрацювання до відмови в стандартному режимі;

τ_{nt} – середній час напрацювання до відмови при температурі t .

Знаючи коефіцієнт прискорення, за цим виразом можна визначити час тренування при температурі $t - \tau_{nt}$, маючи час підвищеної інтенсивності відмов τ_0

$$\tau_{nt} = \tau_0 \cdot K_{np}. \quad (4.19)$$

Якщо під час тренування повинні відмовити всі вироби, що відмовляють за час випробувань в стандартному режимі, то ймовірність безвідмовної роботи в обох випадках повинна бути однаковою:

$$P(\tau_0) = P(\tau_{nt}). \quad (4.20)$$

Якщо вважати, що ймовірність безвідмовної роботи відповідає експоненціальному закону:

$$P(\tau) = \exp(-\lambda t), \quad (4.21)$$

то

$$\lambda_0 \cdot \tau_0 = \lambda_t \cdot \tau_{mt}, \quad (4.22)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов в стандартному режимі випробувань;

λ_t – інтенсивність відмов при підвищеній температурі t .

Звідси відношення часу тренування при різних температурах буде дорівнювати відношенню інтенсивності відмов. Тому середній час напрацювання до відмови буде обернено пропорційним до інтенсивності відмов, а коефіцієнт прискорення буде обернено пропорційним до відношення інтенсивності відмов для відповідних температур.

Легко бачити, що інтенсивність відмов вимірюється швидкістю розвитку дефектів, тобто також залежить від температури за законом Ареніуса. Ця закономірність порушується при виникненні пошкоджень від дії підвищеної температури.

Для виявлення відхилень від закону Ареніуса, який являє собою експоненціальну залежність, зручно експериментальну залежність будувати в напівлогарифмічному масштабі; в якому експоненціальна залежність зображається прямою лінією. Температура, при якій порушується лінійність, є вже недопустимою для тренування. Коефіцієнт прискорення визначається як відношення інтенсивності відмов при допустимій температурі до інтенсивності відмов при стандартній температурі. Час тренування визначається шляхом ділення часу початкового підвищення інтенсивності відмов на коефіцієнт прискорення.

Робота виконується за результатами випробувань при різних температурах, починаючи зі стандартної – 125 °С для кремнієвих приладів з підвищенням кожного разу на 25 °С впродовж часу напрацювання до відмови всіх n виробів. Середня початкова інтенсивність відмов визначається за виразом:

$$\lambda_1 = \frac{n}{N \cdot \tau_1}, \quad (4.23)$$

де N – кількість випробовуваних виробів.

Випробування при наступній температурі $t_2 = 150$ °С виконують до відмови тієї ж кількості виробів n з фіксацією часу випробувань τ_2 . Інтенсивність відмов λ_2 визначається аналогічно. Таким же чином виконуються випробування при наступних ступенях збільшення температури аж до моменту, коли час напрацювання n виробів досягне величини, меншої за одну годину.

Для остаточного рішення про необхідність запровадження операції технологічного тренування необхідно оцінити її ефективність шляхом порівняння середньої інтенсивності відмов до запровадження і після запрова-

дження операції. Перше значення λ_{C1} відоме із попередніх випробувань, а друге λ_{C2} визначається з урахуванням зменшення відмов за час гарантованого строку служби на кількість відмов в процесі тренування. Оцінку останнього параметра можна визначити за виразом:

$$\lambda_{C2} = \frac{n_e - n}{(N - n)\tau_T}, \quad (4.24)$$

де τ_T – гарантований строк служби;

$n_e = N \cdot \lambda_{C1} \cdot \tau_T$ – середня кількість відмов до запровадження операції серед виробів обсягом N .

Якщо зниження інтенсивності відмов є суттєвим, то запровадження операції технологічного тренування доцільне.

Тривалість тренувань ІС та їх місце в технологічному процесі випробувань. Тривалість тренувань залишається проблемою як для виробника, так і для споживача виробів. Мала кількість відмов може трактуватися як наслідок недостатньої тривалості випробувань, і, навпаки, велика кількість відмов може слугувати свідченням надмірної тривалості тренування.

В даний час тривалість ЕТТ різноманітних схем в різних режимах становить 48, 72, 96, 120, 168, 240 год, а в окремих випадках і більше. За даними фірми Fairchild Semiconductor, більша частина проходить протягом перших 96 год. У більшості національних стандартів, а також в міжнародних документах (наприклад, публікація № 747 МЕК) встановлюється обсяг і послідовність проведення бракувальних випробувань ІС, до яких відноситься ЕТТ тривалістю 48, 96, 168 год.

Типова температура для випробувань становить 125 °С, а тривалість випробувань при ЕТТ береться рівною мінімально 48 год, максимально 168 год. Оптимальним часом з точки зору економічної ефективності вважається 96 год. Експериментально підтверджується, що час ЕТТ для МОН ІС завжди більший, ніж для біполярних. Відповідно до стандарту MIL-STD-883 ЕТТ проводиться протягом 168 або 240 год залежно від класу надійності при температурі 125 °С в динамічному режимі і 72 год – при 150 °С в статичному режимі при зворотному зміщенні для виробів підвищеної надійності.

Практично час ЕТТ встановлюється при проведенні неодноразових випробувань на партіях ІС, виготовлених в різний час, шляхом контролю електричних параметрів через кожні 24 год. Якщо, наприклад, після 72 год відмов не спостерігається, то час ЕТТ вибирається рівним 96 год, тобто визначається самою якістю виробів.

Аналіз результатів випробувань показує, що якщо більше 50% відмов ІС є катастрофічними, то це говорить про некерованість і нестабільність технологічного процесу. Відмови в цьому випадку проявляються практично в перші 12 год ЕТТ. При стабільному технологічному процесі виготовлення ІС, коли кількість відмов на ЕТТ менша за 5%, аналіз результатів

випробувань показує, що понад 90% відмов ІС відбувається через відхилення їх електричних параметрів від встановлених норм згідно з ТУ. Стандарт MIL-STD-883 передбачає, що після ЕТТ допустимий відсоток дефектних виробів не повинен перевищувати 5, а для виробів підвищеного класу якості – 3% або один дефектний продукт на партію.

Як правило, бракувальні випробування мають таку послідовність (наприклад, для більшості класів надійності за стандартом MIL-M-38510): термоциклювання, вплив постійного прискорення, перевірка герметичності, перевірка електричних параметрів, ЕТТ і знову перевірка електричних параметрів. Видно, що перевірка герметичності проводиться до ЕТТ. Досвід показує, що для ІС, герметизованих паянням, така послідовність відбракувальних випробувань не гарантує відбракування потенційно ненадійних виробів. ЕТТ при температурі 125 °С (фактична температура на корпусі може бути до 150 °С) розкриває хибно герметичні схеми (через перекриття малих отворів каніфоллю). Тому перевірка герметичності ІС за допомогою паяння проводиться після ЕТТ.

Як правило, тренування проводиться на загерметизованих ІС. Однак практика показує, що в деяких випадках для ІС можливо проводити ЕТТ до герметизації. Перевага такого тренування полягає в тому, що можливим є доопрацювання ІС, які відмовили, без пошкоджень корпусу і внутрішніх елементів. Удосконаленою системою керованого тренування є система випробування ІС під час тренування, тобто тестування одночасно з електротренуванням (TDBI – test during burn in). Оскільки тестування виконується при знаходженні ІС в камері, немає необхідності знижувати температуру в камері і виймати ІС для тестування. Це означає, що загальний час на ЕТТ та випробування коротший, тобто збільшується загальна продуктивність.

Деякі відмови можуть бути виявлені тільки за допомогою системи TDBI, наприклад, випадкові збої ОЗП, викликані дією одиночних альфа-частинок, що випускаються матеріалом корпусів ІС. Ця система дозволяє точно сказати, в який момент відбулося порушення контактування виробів або замикання в гнізді друкованої плати.

Вимоги до бракувальних випробувань ІС за кордоном. Найбільш відпрацьованою в даний час є методика бракувальних випробувань, передбачена стандартом США MIL-STD-88. Вимоги до відбракувальних випробувань класифікуються за трьома рівнями якості і надійності:

- *клас А* – тільки схеми підвищеної надійності, призначені для роботи в жорстких режимах зовнішніх впливів;
- *клас В* – надійні для промислового застосування схеми (і деякі типи схем для військової апаратури), призначені для роботи в менш жорстких умовах, коли головною вимогою є стабільність параметрів протягом тривалого часу;
- *клас С* – схеми для умов роботи, коли зовнішні чинники не є визначальними і коли на перше місце ставиться мінімальна вартість.

Застосування технологічних тренувань викликано необхідністю підвищення надійності партій ІС за рахунок відбраковування потенційно ненадійних схем. Режими і час тренувань залежать від типу ІС, її ступеня інтеграції, технології виготовлення, виду приймання.

Задачі для розв'язування

Задача 4.1 Побудувати структурну схему системи із структурною формулою $1-2/2-3/3-4-5/5/5-6$.

За числовими даними визначити надійність системи:

а) розрахувати інтенсивність відмов кожного елемента, взявши експоненціальний закон розподілу напрацювання на відмову;

б) розрахувати ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента системи протягом заданого періоду експлуатації;

в) розрахувати ймовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого періоду експлуатації.

Визначити найменш надійний елемент (групу елементів) системи. Проаналізувати можливість підвищення надійності системи за рахунок резервування цього елемента (групи): при постійному (навантаженому) резерві та при ненавантаженому резерві (дублювання з відновлюванням). При цьому середній час відновлення роботоздатності найменш надійного елемента t_p взяти з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Середнє напрацювання на відмову

Середнє напрацювання на відмову t_B , год	Період експлуатації t_e , год	$\overline{t_p}$, год
26, 8, 76, 134, 46, 108	11	0,7

Задача 4.2 Система складається з трьох пристроїв з безвідмовностями $P_1(t)=0,79$, $P_2(t)=0,93$, $P_3(t)=0,82$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи.

Задача 4.3 Система складається з чотирьох послідовно з'єднаних пристроїв з інтенсивностями відмов $\lambda_1=5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, $\lambda_2=3 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, $\lambda_3=6 \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}$, $\lambda_4=15 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$. Обчисліть ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 2 год.

Задача 4.4 Система складається з трьох послідовно з'єднаних блоків, середній час безвідмовної роботи яких відповідно $T_1=160$ год, $T_2=320$ год, $T_3=600$ год. Необхідно визначити середній час безвідмовної роботи системи.

Задача 4.5 Обчислити ймовірність безвідмовної роботи системи, що складається з 5 паралельно з'єднаних блоків з ймовірностями безвідмовної роботи $P_1 = 0,6$, $P_2 = 0,65$, $P_3 = 0,5$, $P_4 = 0,55$, $P_5 = 0,4$.

Задача 4.6 Система складається з двох однотипних блоків, з'єднаних паралельно з третім блоком. Враховуючи, що інтенсивність відмови перших двох блоків $\lambda_{1,2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, а інтенсивність відмови третього блоку $\lambda_3 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ обчисліть ймовірність безвідмовної роботи системи протягом $t = 5$ год.

Задача 4.7 Система складається з 4 мікроелектронних пристроїв з постійними інтенсивностями відмов $\lambda_1(t) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}$, $\lambda_2(t) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}$, $\lambda_3(t) = 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}$, $\lambda_4(t) = 15 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}$. Відмова будь-якого пристрою призводить до відмови системи. Визначити ймовірність відмови системи протягом 2 годин.

Контрольні запитання

1. В чому полягає природа низькочастотних шумів мікроелектронних приладів?
2. Принцип відбракування потенційно ненадійних виробів за шумами.
3. Яка умова можливості розрахунку надійності на основі структурних схем?
4. Перерахуйте відомі способи з'єднання елементів в систему.
5. Як визначити надійність системи при послідовному з'єднанні елементів?
6. Запишіть формулу для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи з послідовно з'єднаних елементів, надійність яких підлягає експоненціальному закону.
7. Чи можливе створення високонадійних систем за умови тільки послідовного з'єднання елементів?
8. Що таке резервування? Яка відмінність між резервуванням та дублюванням елементів системи?
9. Охарактеризуйте відомі види резервування.
10. Чим обумовлені високі значення інтенсивності відмов приладів мікро- та наноелектроніки в період початкового напрацювання?
11. Охарактеризуйте напрямки збільшення надійності ІМС.
12. Розкажіть коротко про види технологічного тренування.
13. Що являє собою операція «термотренування»?

5 ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

5.1 Загальна характеристика випробувань на надійність

Випробування на надійність проводяться з метою отримання інформації про показники надійності виготовлених пристроїв. Випробування необхідні, оскільки на стадії проектування апаратури розробник не володіє повними даними, які дозволили б заздалегідь визначити показники надійності з високою достовірністю.

Випробування на надійність є частиною заводських випробувань і можуть входити до програми державних випробувань при здачі апаратури замовнику.

Важливим джерелом інформації є система збору даних про роботу апаратури в процесі експлуатації.

Існують два види випробувань на надійність:

- визначальні випробування – проводиться оцінювання показників надійності. Визначальні або ресурсні виконують з метою отримання показників і параметрів надійності;
- *контрольні випробування (proof-testing)* – проводиться перевірка відповідності технічним умовам показників надійності системи або окремих пристроїв. Контрольні випробування поділяють на випробування на довговічність і випробування на безвідмовність. Контрольні випробування менш довготривалі і їх результати використовують для коригування технологічного процесу з метою підвищення надійності виробів.

Перші з них проводять протягом, як правило, гарантованого строку служби. Другі – протягом не більше 1000 годин з розрахунку щоквартального випробування. Випробування на безвідмовність – це скорочені в часі і прискорені за режимом випробування, покликані давати оперативну інформацію про стан технологічного процесу. При незадовільних результатах цих випробувань відвантаження продукції споживачеві призупиняється, розробляються організаційно-технічні заходи з відшукування і ліквідації причин погіршення надійності виробів. Після виконання розроблених заходів виготовляється партія виробів, з яких відбирається вибірка для повторних випробувань і при задовільних їх результатах відвантаження продукції (виробів, виготовлених після виконання розроблених заходів) відновлюється.

Питання організації випробувань приладів мікро- і наноелектроніки, задачі збору та обробки статистичної інформації є однаково важливими при будь-яких видах випробувань на надійність – визначальних, спеціальних та ін.

При організації випробувань приладів мікро- і наноелектроніки на надійність необхідно враховувати такі фактори:

- режим функціонування мікроелектронних приладів в процесі випробування (неперервний, циклічний);
- характер зовнішніх дій (механічні, кліматичні, електричні, комплексні, неруйнівний контроль, руйнівний фізичний аналіз);
- об'єкти збору і склад фіксованої інформації;
- форми обліково-звітної документації;
- правила зупинення випробувань;
- склад, обов'язки і відповідальність операторів (контролерів) випробувальних груп.

Від ступеня опрацювання і врахування вказаних факторів при підготовці випробувань залежить достовірність отриманих оцінок показників надійності приладів мікро- і наноелектроніки.

Режим функціонування. Найбільш повну інформацію можна отримати при неперервному контролі процесу випробування, коли достатньо точно фіксуються моменти відмов мікроелектронних приладів. Однак такі умови не завжди можливо забезпечити.

Якщо заданий рівень показників надійності і спеціально не обумовлені відповідні умови, то при випробуваннях необхідно забезпечити найбільш характерні для даного виробу умови функціонування.

Періодичний контроль забезпечує фіксацію відмов виробів у визначені планом випробувань проміжки часу. Для статистичної обробки результатів випробувань бажано заданий або розрахунковий час випробувань ділити на 10 – 15 контрольних періодів.

Характер зовнішніх впливів. До зовнішніх факторів, що впливають на прилади мікро- і наноелектроніки, відносяться: підвищена та знижена температура середовища; швидка, поступова та раптова зміна температур; підвищена вологість; соляний туман; сонячна радіація; динамічний і статичний пил; підвищений і знижений атмосферний тиск; плісняві гриби; синусоїдальна і широкосмугова випадкова вібрація; механічні удари одноразової та багаторазової дії; кутові та лінійні прискорення; акустичні шуми; фактори космічного простору (за спеціальною програмою).

Об'єкти збору і склад фіксованої інформації. Правильний вибір об'єктів збору статистичної інформації, особливо для складних мікроелектронних приладів, є непростою задачею. При занадто дрібному поділі виробів мікро- та наноелектроніки на самостійні об'єкти збору статистичної інформації ускладнюється робота з обліковою документацією, що призводить до зниження достовірності отримуваних результатів. При надлишковому укрупненні об'єктів збору статистики може загубитись необхідна деталізація інформації про причину, місце відмови і про фактичне напруження окремих блоків та приладів.

Особливістю статистичного оцінювання показників надійності є великий обсяг відомостей, які необхідно фіксувати під час кожного випадку

порушення функціонування. Тому в процесі випробувань на надійність необхідно забезпечити фіксацію такої інформації:

- загальне напрацювання виробу і час роботи від моменту попередньої відмови;
- використовувані методи діагностики і місце виявлення відмови;
- причина відмови (поломка, зношування деталі, відхилення параметрів та ін.);
- спосіб усунення відмови (заміна елемента, регулювання та ін.);
- умови середовища в момент відмови об'єкта випробування (температура, вібрація, удари та інші фактори, в тому числі і маніпуляція персоналу, який проводив випробування).

Достовірність первинної інформації забезпечується повнотою і регулярністю її фіксації, а також глибиною і об'єктивністю аналізу причин відмов. Потрібно мати на увазі, що недостовірні первинні дані неможливо відкоригувати навіть найретельнішою обробкою результатів випробувань.

Форми обліково-звітної документації. Найбільш поширеними обліковими документами при випробуваннях на надійність є журнал випробувань і картка обліку відмов. Журнал служить оператору, що проводить випробування, своєрідним формуляром, в якому в хронологічному порядку відображено стан мікроелектронних приладів: час і дата початку і кінця випробування; правильність функціонування; моменти виявлення відмов і їх зовнішні ознаки; час відновлення (пошук і усунення відмови) та ін.

В журнал записуються також всі зауваження обслуговуючого персоналу щодо якості функціонування, зручності обслуговування та ремонту. Записи в журналі використовуються для заповнення картки обліку відмов (несправностей).

Картки обліку відмов (несправностей) використовуються для накопичення статистичної інформації про відмови приладів мікро- і наноелектроніки за різноманітними ознаками, на основі якої розробляються заходи із підвищення надійності конкретних типів виробів.

Правила зупинки випробувань, склад, обов'язки та відповідальність операторів випробувальних груп залежать від типу мікроелектронних приладів і вказуються в НТД.

Якісний аналіз відмов і попередня обробка результатів випробувань мікроелектронних приладів. Основними задачами якісного аналізу є об'єднання і класифікація статистичної інформації, отриманої під час випробувань мікроелектронних приладів.

Важливим засобом збільшення обсягу статистичної інформації є об'єднання відомостей про відмови і напрацювання однотипних виробів, отриманих при випробуваннях однотипної продукції на різних підприємствах, при цьому можливість і доцільність об'єднання інформації повинні бути обумовлені інженерними міркуваннями.

З точки зору задач статистичного оцінювання надійності, найбільш важливими вважаються дві групи класифікації відмов – за причинами виникнення і щодо оцінюваних показників надійності.

1. *Класифікація відмов за причинами виникнення.* Виділяють такі групи відмов: конструктивні, технологічні, виробничі та експлуатаційні. Для програмно керованих виробів, крім перерахованих, виділяють також алгоритмічні та програмні.

В результаті помилок або недоробок в алгоритмах або програмах навіть справні вироби в ряді випадків не можуть виконувати свої функції. Для таких відмов характерним є те, що вони проявляються однаково у всіх однотипних мікроелектронних приладах при виникненні відповідних умов.

2. *Класифікація відмов щодо оцінюваних показників надійності.* Вона передбачає поділ відмов на "враховані" та "невраховані". При цьому до неврахованих належать:

- відмови, які викликані зовнішніми факторами, що не передбачені НТД на виріб, а також відмови через порушення інструкцій з технічної експлуатації;
- відмови дослідних зразків, причини яких усуваються в процесі доопрацювань;
- відмови, що не впливають на конкретний оцінюваний показник.

5.2 Прискорені випробування приладів мікро- і наноелектроніки на надійність

Складність і відповідальність задач, що вирішуються за допомогою приладів мікро- і наноелектроніки, висувають високі вимоги до їх надійності. Так, навіть не дуже складні мікроелектронні прилади можуть містити до 10^6 елементів. При значенні інтенсивності відмов елементів $\lambda=10^{-6}$ 1/год, середнє напрацювання до відмови t_{cp} (або на відмову t_0 для відновлюваних систем) такої апаратури становить одну годину, тобто практично вона виявляється нероботоздатною.

Спостерігається також тенденція до збільшення технічного ресурсу t_p з певними показниками надійності. Як правило, ймовірності безвідмовної роботи, що задаються, – $P(t_p)=0,9-0,99$ при досить великих значеннях t_p .

Для визначення відповідності мікроелектронних приладів таким високим вимогам надійності необхідно проведення випробовувань великих обсягів вибірок. При цьому час випробувань і витрати на них збільшуються.

Перераховані складності є причиною пошуку таких методів, які б дозволили скоротити тривалість і обсяг вибірки випробувань. Прискорені випробування мають на меті виявити зміни параметрів елементів і складальних одиниць приладів мікро- і наноелектроніки при скороченні тривалості випробувань за рахунок інтенсифікації режимів роботи і умов експлуатації виробів.

У загальному випадку величину, що показує у скільки разів зменшується значення показників довговічності або терміну зберігання при випробуваннях, відносно заданих значень показників довговічності або терміну зберігання в експлуатації, називають *коефіцієнтом прискорення випробувань*

$$K_{II} = \frac{t_N}{t_n}, \quad (5.1)$$

де t_N та t_n – час випробування в нормальному та прискореному режимах, відповідно.

Прискорення випробувань мікроелектронних приладів зазвичай досягається посиленням впливних факторів (температури, вологості, електричних, механічних та ін. навантажень).

Основною науковою проблемою теорії випробовувань, в тому числі і прискорених, є розробка та дослідження моделей об'єктів і процесів їх старіння та зношування. Можна виділити три основних методи прискорення випробувань (рис. 5.1).

Перший метод, що називається форсованими випробуваннями, полягає в підсиленні режимів випробувань. В даному режимі, як правило, перевищують граничні значення, при яких ще зберігається нормальна робота мікроелектронних приладів.

Недоліками подібного методу випробувань є:

- можливість непередбачуваної зміни фізико-хімічних процесів старіння, зносу або самовідновлення елементів і складальних одиниць;
- практична неможливість числового оцінювання кореляції між значеннями параметрів випробувань в нормальних і підсиленних режимах;
- неможливість кількісного оцінювання показників надійності випробуваних виробів – технічного ресурсу, часу напрацювання на відмову, збережності та ін.

Враховуючи вищенаведені особливості, перший метод прискорення можна використовувати при порівняльних або контрольних випробуваннях. Для проведення визначальних випробувань даний метод прискорення практично непридатний.

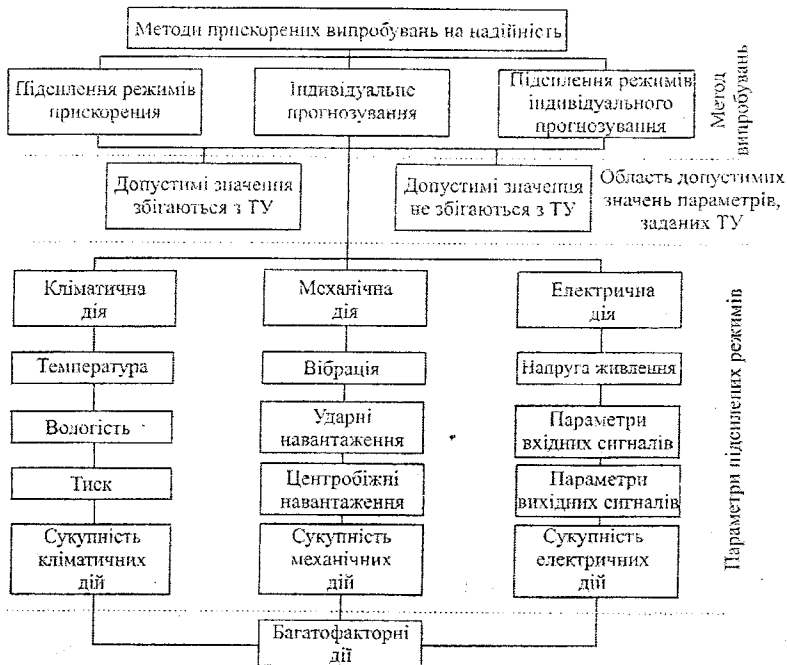


Рисунок 5.1 – Основні методи прискорених випробувань

Другий метод прискорених випробувань оснований на часовому оцінюванні поведінки прогнозованого параметра. В даному випадку враховується еволюційна тенденція розвитку процесів старіння та зносу, і тим самим визначається момент відмови. Для високонадійних мікроелектронних приладів можливі варіанти припинення випробувань до настання відмови. Як прогнозовані показники можуть бути показники якості виробу або функції цих показників.

Основними недоліками другого методу прискорених випробувань є:

- складність знаходження прогнозованих параметрів (особливо в складних мікроелектронних приладах), пов'язана із врахуванням одночасно діючих багаточисельних факторів;
- обмежена можливість встановлення гранично-допустимих режимів функціонування приладів мікро- та наноелектроніки, що не дозволяє з високою достовірністю прогнозувати моменти їх відмови;
- малі значення коефіцієнтів прискорення, які знаходяться в межах 2,0 – 3,5.

Враховуючи вищевикладені обставини, другий метод доцільно використовувати для деяких випробувань, а також у випадку необхідності розді-

лення виробів за якісними групами. Крім того, даний метод знайшов використання під час прискорених неруйнівних випробувань.

Третій метод прискорених випробувань полягає в спільному використанні першого та другого методів. Для третього комбінованого методу прискорених випробувань характерні такі недоліки:

- неможливість проведення одночасного випробування декількох виробів;
- складність обчислювальних процедур.

Під час аналізування недоліків кожного методу прискорених випробувань необхідно враховувати, що широке використання цифрової обчислювальної техніки, в основному, виключає всі недоліки, пов'язані з великим обсягом обчислень. Очевидно, що для підвищення ефективності випробувань на надійність і зменшення витрат потрібно там, де можливо, збільшувати обсяги обчислень, якщо вони приводять до спрощення або скорочення строків самих випробувань.

Методику прискорених випробувань, зазвичай, розробляють на основі нормативно-технічної документації (НТД) із врахуванням специфіки функціонування, призначення, умов експлуатації і конструктивних особливостей приладів мікро- і наноелектроніки. Проводити прискорені випробування допускається тільки в технічно обумовлених випадках відповідно до НТД на виріб.

Під час прискорених випробувань необхідно, щоб критерій розподілу відмов за часом і за причинами відповідав критерію та розподілу при нормальних випробуваннях на надійність.

Форсування випробувань апаратури, що вперше розробляється і серійно випускається, організовується по етапах:

- розробка методики вибору форсованих факторів і форсованого режиму (на основі наявних статистичних даних) для забезпечення максимально можливого прискорення випробувань. При цьому фізична природа виникнення відмов повинна залишатися незмінною;
- визначення інтервальних значень коефіцієнта прискорення при різних зовнішніх впливних факторах і знаходження різних законів розподілу часу безвідмовної роботи мікроелектронних приладів;
- визначення динаміки розподілу і виявлення причин відмов під час нормальних випробувань (врахування принципу спадковості);
- оцінювання залежності між ймовірностями безвідмовної роботи в нормальному і форсованому режимах;
- формування вихідних даних для проведення прискорених випробувань на надійність.

Для кінцевого уточнення даних умов і часу форсованих випробувань необхідно враховувати час технологічного напрацювання випробовуваних приладів мікро- і наноелектроніки. Як відомо, проведення технологічного напрацювання дозволяє виявляти і видаляти приховані дефекти, що допущені в процесі проектування, виробництва і випробування.

5.3 Планування прискорених випробувань на надійність

Плани контролю складаються з використанням обсягів вибірок за таблицями стандарту. У цих таблицях розрізняють такі типи планів контролю:

а) *одноступеневі плани* – характеризуються найбільшим обсягом вибірки, їх слід застосовувати в таких випадках:

- вартість контролю виробів є невеликою;
- тривалість контролю є занадто тривалою;

б) *двоступеневі плани* – характеризуються проміжним обсягом вибірки (меншим, ніж в одноступеневих планах і більшим, ніж в багатоступеневих планах). Ці плани слід застосовувати в тому випадку, коли не можна застосовувати одноступеневі плани через великий обсяг вибірки;

в) *багатоступеневі плани* – характеризуються найменшим очікуваним числом контрольованих виробів в даному плані контролю. Ці плани слід застосовувати у випадку, якщо час, необхідний для відбору і контролю одиниць продукції, є невеликим, а вартість випробування є великою;

г) *плани послідовного контролю* – рекомендується застосовувати тоді, коли з економічних та технічних міркувань є необхідним контроль невеликих вибірок і коли багаторазовий випадковий відбір вибірки, що складається з однієї одиниці продукції, не є утрудненим, а вартість відбору невелика.

При плані одноступеневого контролю число контрольованих виробів дорівнює обсягу вибірки, вказаної в плані. Якщо число дефектних виробів, виявлених у вибірці, одиниця або менше приймального числа K , партія приймається. Якщо число дефектних виробів дорівнює або більше числа бракування R , партія бракується. Оскільки при одноступеневому контролі рішення приймають за результатами тільки однієї вибірки або проби, то ця вибірка повинна добре відображати властивості всієї партії і для цього бути випадковою. Випадкову вибірку отримують відбором з різних частин партії. Порядок дій при застосуванні одноступінчастих планів контролю показаний на рис. 5.2.

При плані двоступеневого контролю число контрольованих виробів дорівнює обсягу першої вибірки, вказаної в плані. Якщо число дефектних виробів, виявлених в першій вибірці, одиниця або менше першого приймального числа $K1$, партія приймається.

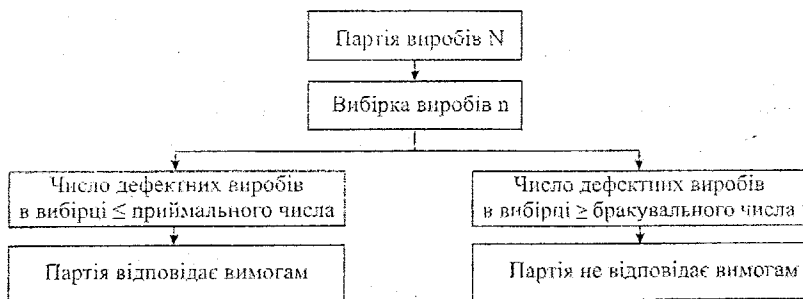


Рисунок 5.2 – Порядок дій при застосуванні одноступеневих планів контролю

Якщо число дефектних виробів, виявлених в першій вибірці, дорівнює чи перевищує перше бракувальне число $R1$, партія бракується. Якщо число дефектних виробів, виявлених в першій вибірці, знаходиться між першим приймальним і бракувальним числами, контролю підлягає друга вибірка, зазначена в плані контролю. Числа дефектних виробів, виявлені в першій і другій вибірках, додаються. Якщо сумарне число дефектних виробів одиниця або менше другого приймального числа $K2$, партія приймається. Якщо сумарне число дефектних виробів одиниця або перевищує друге бракувальне число $R2$, партія бракується. На рис. 5.3 показано хід дії двоступеневих планів контролю.

Порядок проведення багатоступеневого контролю аналогічний двоступеневому контролю, за винятком того, що число послідовних вибірок може бути більше двох.

Планування контрольних випробувань на надійність виконують з використанням параметра надійності у вигляді інтенсивності відмов, який для виробів електронної техніки є практично постійною величиною і, відповідно, з ймовірністю безвідмовної роботи, що відповідає експоненціальному закону. Для планування випробувань використовують також середнє значення інтенсивності відмов λ_C , яке визначається за результатами визначення середнього рівня надійності (для щойно освоєного виробу можна використати параметр надійності найближчого аналога, що випускається на цьому ж підприємстві). За погодженням зі споживачем в порядку укладання угоди на постачання встановлюється також гарантоване значення інтенсивності відмов λ_T . Зазвичай встановлюють за умови $\lambda_C > \lambda_T$.

Випробування на надійність є вибірковими випробуваннями. Тому для планування випробувань необхідно встановити граничне значення частки ненадійних виробів у виготовлюваній продукції, що відмовляють впродовж часу випробувань t_B :

$$q_T = \lambda_T t_B. \quad (5.2)$$

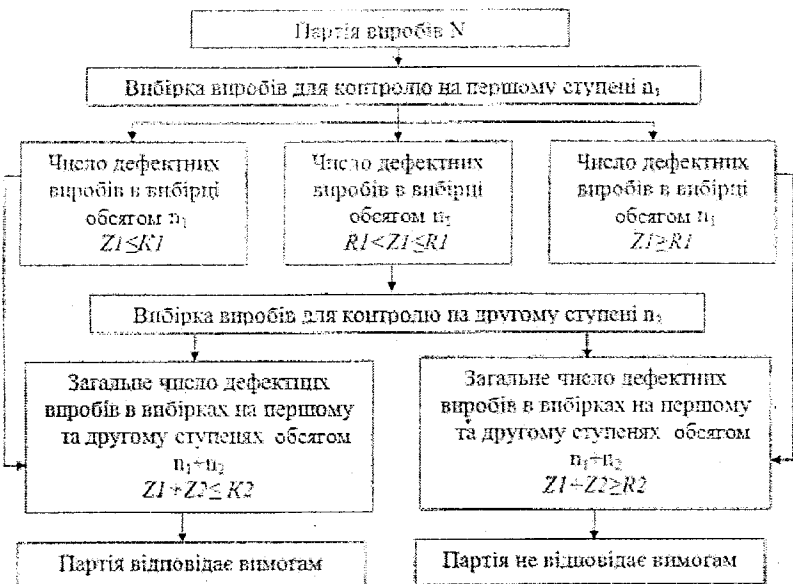


Рисунок 5.3 – Порядок дій при застосуванні багатоступеневих планів контролю

Якщо використовуються прискорені методи випробувань з коефіцієнтом прискорення K_D , то

$$q_{\Gamma} = K_{\Pi} \lambda_{\Gamma} t_B. \quad (5.3)$$

Найчастіше випробування виконують при недопустимості відмов для задовільного результату. Особливо це стосується випробувань на безвідмовність (звідси походить і назва випробувань). Тому кількість випробуваних виробів визначається за виразом:

$$n = \frac{0,69}{q_{\Gamma}}. \quad (5.4)$$

Тут обсяг партії не враховується, оскільки оцінюється не партія продукції, а вся виготовлена продукція.

Як правило, підприємство має готове устаткування для проведення випробувань, розраховане на одночасне випробування певної кількості виробів n . Тому з метою повного використання обладнання можна визначити час випробувань, підставляючи (5.4) в (5.3) або в (5.2)

$$t_B = \frac{0,69}{K_{II} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}}. \quad (5.5)$$

Достовірність випробувань при недопустимості відмов досить низька і визначається виразом

$$P_{II} = 0,72 + \frac{0,03\lambda_{\Gamma}}{\lambda_C}. \quad (5.6)$$

Вважається, що під час технологічного процесу рівень надійності в часі може змінюватись згідно з експоненціальним законом розподілу інтенсивності відмов.

Як видно з виразу (5.6), достовірність традиційного плану випробувань не дуже висока. Тому, за змоги, бажано застосувати випробування при допустимості однієї відмови. Тоді

$$n = \frac{1,69}{q_{\Gamma}}, \quad (5.7)$$

$$t_B = \frac{1,69}{K_{II} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}}, \quad (5.8)$$

$$P_{II} = 0,78 + \frac{0,03\lambda_{\Gamma}}{\lambda_C}. \quad (5.9)$$

Можна застосувати план випробувань з двома допустимими відмовами, тоді

$$\dot{n} = \frac{2,69}{q_{\Gamma}}, \quad (5.10)$$

$$t_B = \frac{2,69}{K_{II} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}}, \quad (5.11)$$

$$P_{II} = 0,8 + \frac{0,03\lambda_{\Gamma}}{\lambda_C}. \quad (5.12)$$

Випробування на безвідмовність можуть виконуватись за схемою двоступеневого контролю, очевидно за *найпростішим планом*: за відсутності відмов при перших випробуваннях вони вважаються задовільними, а за

двох і більше відмов – незадовільними. При одній відмові береться друга вибірка для випробувань. Обсяг вибірок визначається за виразами:

$$n_1 = \frac{1,145}{q_{\Gamma}}, \quad n_2 = \frac{0,69}{q_{\Gamma}}, \quad (5.13)$$

а час випробувань

$$t_{B1} = \frac{1,145}{K_{\Pi} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}}, \quad t_{B2} = \frac{0,69}{K_{\Pi} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}} \quad (5.14)$$

та достовірність

$$P_{\Pi} = 0,753 + \frac{0,043 \lambda_{\Gamma}}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (5.15)$$

Якщо при повторних випробуваннях зафіксовано хоча б одну відмову, то випробування вважаються незадовільними.

Якщо в повторних випробуваннях допустити одну відмову, тоді обсяг другої вибірки буде:

$$n_2 = \frac{1,68}{q_{\Gamma}}, \quad (5.16)$$

а час повторних випробувань

$$t_{B2} = \frac{1,68}{K_{\Pi} \cdot n \cdot \lambda_{\Gamma}}. \quad (5.17)$$

Достовірність випробувань в цьому випадку також зміниться:

$$P_{\Pi} = 0,802 + \frac{0,032 \lambda_{\Gamma}}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (5.18)$$

Оскільки повторні випробування будуть виконуватись нечасто, то дво-ступеневі випробування можуть бути вигідними.

5.4 Контроль показників надійності при заданих планах випробувань

Контроль показників надійності в процесі випробувань має на меті забезпечити приймання приладів мікро- та наноелектроніки з рівнем надійності $R \geq R_{np}$, де R_{np} – необхідний рівень надійності мікроелектронних приладів даного типу.

Ймовірність приймання будь-якого пристрою залежно від його якості, в тому числі, і його найважливішого показника – надійності, оцінюється за допомогою оперативної характеристики – плану контролю. На рис. 5.4 показано два види оперативних характеристик плану контролю на надійність: ідеальна та реальна.

Отримання ідеальної оперативної характеристики з рівнем надійності R_{np} пов'язано з необхідністю проведення випробування дуже великого обсягу вибірки однотипних мікроелектронних приладів, що практично можна вважати недопустимим. На реальній оперативній характеристиці вказуються рівні приймального R_0 та бракувального R_1 показників надійності і відповідні даним рівням імовірності ризиків постачальника α та замовника β .

Як видно з рис. 5.4

$$\alpha = 1 - L(R_0), \quad (5.19)$$

$$\beta = L(R_1). \quad (5.20)$$

Вироби з рівнем надійності $R \geq R_0$ вважаються, такими, що задовольняють технічні вимоги і приймаються. Навпаки, вироби, з $R < R_1$ неприйнятні і бракуються.

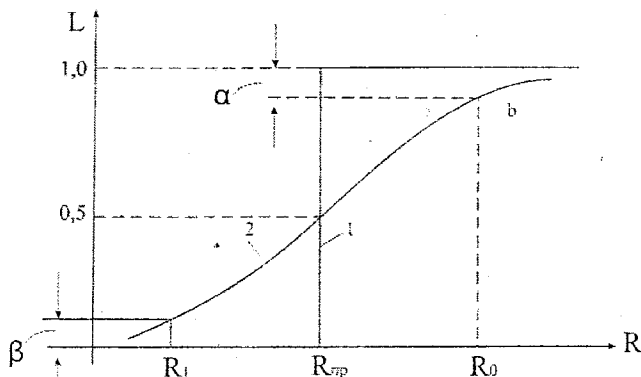


Рисунок 5.4 – Оперативні характеристики плану контролю надійності: 1 – ідеальна; 2 – реальна

Числа R_1 , α та β визначають точки a , b реальної оперативної характеристики, що дозволяє вибрати план контролю і обсяг вибірки n при випробуванні. При цьому обсяг вибірки n є єдиним обмеженням, яке не дозволяє

довільно зменшувати ризики α та β і таким чином наближувати приймальний R_0 та бракувальний R_1 рівні.

Розташування інтервалу $[R_1, R_0]$ відносно рівня надійності R_{np} при $\alpha = \beta$ повинно вибиратись із врахуванням збитків, що наносяться постачальнику і замовнику. Найбільш прийнятним є той випадок, коли збитки замовника і постачальника співвідносні ($\alpha \cong \beta$), а інтервал $[R_1, R_0]$ розташовується приблизно симетрично відносно рівня надійності R_{np} , тобто $L(R_{np}) \cong 0,5$.

Отримані після випробувань величини показників надійності R'_0 та R'_1 , як правило, відрізняються від запланованих.

Значення ймовірностей α та β при плануванні випробувань на надійність вибираються заздалегідь з розрахунком на найгірший результат, що відповідає умовам

$$\alpha' \leq \alpha; \beta' \leq \beta. \quad (5.21)$$

В процесі розробки мікроелектронних приладів контроль надійності проводиться, як мінімум, один раз на приймальних випробуваннях, за змоги використовуючи також статистику попередніх та інших випробувань. При серійному виробництві приладів мікро- і наноелектроніки контроль надійності зазвичай передбачається у складі періодичних випробувань. Контроль надійності високонадійних дрібносерійних виробів доцільно проводити при типових випробуваннях у випадках зміни конструкції, технології або впровадження нових комплектуючих. Підставою для проведення подібного контролю надійності можуть служити відомості про її недостатній рівень, отримані за результатами будь-яких випробувань або експлуатації даного типу мікроелектронних приладів. Контроль складних за конструкцією мікроелектронних приладів з широким застосуванням резервування може бути віднесений до складу приймально-здавальних випробувань, оскільки великий обсяг одержуваної статистики і використання розрахунково-аналітичних методів для контролю показників надійності дозволяють істотно скоротити час та витрати на випробування.

Одноступеневий контроль показників надійності типу напрацювання і ймовірності. Розглянемо контроль показників надійності для найбільш поширених випадків типу напрацювання і ймовірності. Одночасно будемо вважати, що напрацювання між відмовами мікроелектронних приладів має експоненціальний розподіл, а тривалість випробування обмежується граничним часом (напрацюванням) або ймовірністю безвідмовної роботи.

Для вибору плану контролю абсолютні значення рівнів надійності $R_0 = T_0$ та $R_1 = T_1$ неістотні. План контролю визначається лише їх відношеннями T_0/T_1 та ризиками α і β . Крім того, з метою спрощення проце-

су випробування, приймання (бракування) доцільно проводити не за рівнем показника надійності, а за функціонально пов'язаним з ним числом відмов.

В процесі контролю напрацювання на відмову фіксується сумарне за усіма N контрольованими зразками приладів мікро- і напoeлектроніки число відмов r , а також сумарне напрацювання

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_{Hi}, \quad (5.22)$$

де t_{Hi} – напрацювання i -го виробу.

План контролю містить в собі: бракувальне число відмов $r_{\delta p}$ і граничне сумарне напрацювання t_{max} . Контроль припиняється, як тільки буде досягнуто одне із вказаних значень.

За умови $r = r_{\delta p}$ і $t_{\Sigma} < t_{max}$ результати випробувань на надійність вважаються незадовільними (вироби бракуються). Якщо $t_{\Sigma} = t_{max}$, а $r < r_{\delta p}$ – вироби приймаються.

План випробувань для показників надійності типу напрацювання при одноступеневому контролі вибирається із врахуванням даних таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики планів випробувань для показників надійності типу напрацювання при одноступеневому контролі

Вихідні дані T_0/T_1 для β , що дорівнює				План контролю		\bar{t}_K/T_0
0,05	0,10	0,20	0,30	$\chi_{\delta p}$	t_{max}/T_0	
				$\alpha = 0,05$		
58,820	45,450	31,250	23,250	1	0,052	0,04898
13,330	10,990	8,403	6,850	2	0,356	0,33850
7,692	6,493	5,235	4,425	3	0,817	0,803
5,682	4,878	4,032	3,484	4	1,366	1,344
4,651	4,065	3,413	2,994	5	1,970	1,944
4,032	3,546	3,030	2,681	6	2,613	2,587
3,646	3,205	2,762	2,469	7	3,285	3,252
3,350	2,958	2,570	2,315	8	3,981	3,945
3,077	2,770	2,427	2,193	9	4,695	4,652
2,898	2,618	2,309	2,102	10	5,425	5,376
2,747	2,500	2,217	2,020	11	6,169	6,120

Продовження таблиці 5.1

Вихідні дані T_0/T_1 для β , рівного				План контролю		\bar{t}_K/T_0
0,05	0,10	0,20	0,30	$\chi_{бр}$	t_{max}/T_0	
$\alpha = 0,05$						
2,631	2,398	2,137	1,957	12	6,924	6,876
2,531	2,315	2,070	1,901	13	7,689	7,635
2,445	2,242	2,012	1,855	14	8,464	8,413
2,369	2,178	1,961	1,815	15	9,246	9,190
2,096	1,961	1,779	1,658	20	13,200	13,134
1,942	1,815	1,669	1,567	25	17,300	17,230
1,835	1,721	1,597	1,515	30	21,500	21,414
$\alpha = 0,10$						
28,570	21,740	15,380	11,360	1	0,105	0,095
8,928	7,299	5,650	4,587	2	0,532	0,503
5,714	4,831	3,891	3,278	3	1,102	1,069
4,444	3,831	3,164	2,732	4	1,745	1,694
3,769	3,289	2,762	2,421	5	2,432	2,374
3,333	2,941	2,519	2,222	6	3,152	3,082
3,039	2,703	2,331	2,083	7	3,895	3,813
2,825	2,525	2,198	1,980	8	4,656	4,568
2,659	2,392	2,096	1,897	9	5,432	5,340
2,525	2,283	2,012	1,831	10	6,221	6,121
2,415	2,193	1,945	1,776	11	7,020	6,915
2,325	2,118	1,887	1,730	12	7,829	7,711
2,247	2,057	1,838	1,962	13	8,646	8,524
1,915	1,792	1,626	1,515	20	14,520	14,346
1,792	1,672	1,538	1,445	25	18,840	18,651
1,706	1,602	1,486	1,408	30	23,230	23,020

Таблиця складена для заданих значень α та β і таких відношень T_0/T_1 , щоб числа відмов $r_{бр}$ набували дискретних і цілих значень (1, 2, 3 ...). В таблиці наведено також значення середньої тривалості контрольної процедури \bar{t}_K і сумарного напрацювання t_{max} , віднесеного до середнього напрацювання на відмову T_0 . Відношення T_0/T_1 обчислені для кожної пари значень α та β і 18 значень $r_{бр}$ за формулою

$$T_0/T_1 = \chi_{1-\beta}^2 / \chi_{\alpha, 2r_{бр}}^2, \quad (5.23)$$

де $\chi_{1-\beta}^2 / \chi_{\alpha, 2r_{бр}}^2$ – табличні квантили рівнів;

$1 - \beta$, α та $\chi_{\alpha, 2r_{op}}^2$ – розподіл з $2r_{op}$ ступенями свободи.

Величина t_{max}/T_0 визначається як

$$t_{max}/T_0 = 1/2 \chi_{\alpha, 2r_{op}}^2. \quad (5.24)$$

Оперативна характеристика будь-якого із наведених в таблиці планів може бути побудована із врахуванням залежності

$$L(T) = \sum_{r=0}^{r_{op}-1} \frac{(t_{max}/T)^r e^{-t_{max}/T}}{r!}. \quad (5.24)$$

Тривалість випробування приладів мікро- і наноелектроніки можна змінювати в широких межах за рахунок пропорційної зміни числа контрольованих виробів з єдиним умовою: забезпечити необхідне сумарне напруження.

Таблиця 5.2 – Кількість випробувань N при одноступеневому контролі

P_0	$\alpha = \beta = 0,1$				$\alpha = \beta = 0,2$			
	$\frac{1-P_1}{1-P_0} = 2,0$	2,5	3,0	4,0	2,0	2,5	3,0	4,0
	$\chi_{0,99}^2 = 14$	8	6	4	6	4	3	2
0,999	9470	4655	3150	1745	3905	2295	1535	825
0,998	3735	2328	1575	872	1953	1148	768	413
0,997	3158	1552	1050	582	1302	765	512	275
0,996	1369	1164	788	436	977	574	384	207
0,995	1895	931	630	349	781	459	307	165
0,994	1578	776	525	291	651	382	256	138
0,993	1353	665	450	249	558	328	220	118
0,992	1884	582	394	218	489	287	192	103
0,991	1052	518	350	194	434	255	171	92
0,990	947	466	315	175	391	230	154	83
0,980	473	233	158	87	196	115	77	42
0,970	315	155	105	58	131	77	52	28
0,960	237	116	79	44	98	58	39	21
0,950	189	93	63	35	78	46	31	17
0,940	158	78	53	29	66	38	26	14
0,930	135	67	45	25	56	33	22	12
0,920	118	58	40	22	49	29	20	11
0,910	106	52	35	20	44	26	17	10
0,900	95	47	32	18	37	23	16	9

Одноступеневий контроль показників надійності типу ймовірності. Подібний контроль передбачає організацію N незалежних дослідів, в кожному з яких фіксується факт напрацювання часу t , що дає можливість оцінити ймовірність $P(t)$. Допускається й інший варіант (контроль К): у вибраний момент часу визначається роботоздатність виробу. Після N -го дослідів виробу приймаються, якщо сумарне число відмов не більше заздалегідь обчисленого оціночного нормативу $R_{\sigma p}$, а в іншому випадку – бракуються.

Як відомо з теорії ймовірностей, випробування можуть проводитися як на одному, так і на декількох (до N включно) зразках виробів, за умови, що незалежність дослідів буде забезпечена або за рахунок повного відновлення виробу, який відмовив, до початку чергового дослідів, або за рахунок рознесення дослідів в часі чи за зразками. Таким чином, план контролю показників надійності типу ймовірності ґрунтується на перевірці двох чисел N та $r_{\sigma p}$. План контролю вибирається за заданими величинами P_0 , P_1 , α і β за допомогою таблиці 5.2

Значення N і $r_{\sigma p}$, які наведені в таблиці, обчислені за допомогою системи рівнянь

$$\sum_{i=0}^{r_{\sigma p}-1} C_N^i P_0^{N-i} (1-P_0)^i = 1-\alpha; \quad (5.25)$$

$$\sum_{i=0}^{r_{\sigma p}-1} C_N^i P_0^{N-i} (1-P_0)^i = \beta. \quad (5.26)$$

Незалежність дослідів під час контролю показників надійності можна забезпечити по-різному. При експоненціальному розподілі відмов N циклів роботи тривалістю t можна планувати з будь-яким числом зразків від 1 до N . Якщо ж закон розподілу відрізняється від експоненціального або він невідомий, то кожен цикл необхідно проводити з окремим зразком, тобто для випробування буде потрібно N зразків.

Плани випробувань на надійність записуються поєднанням трьох символів $[NVT]$, $[NVr]$, $[NRT]$ та ін. Наприклад, поєднання символів $[NRT]$ означає, що випробуванню піддається N пристроїв, які відмовили під час випробування пристрою; вони замінюються справним R , після напрацювання T годин випробування припиняється.

Перша літера N вказує на те, що на випробування поставлено N об'єктів. Друга літера визначає порядок проведення випробувань. Іншими словами, яку дію слід виконувати в разі появи відмови. Тут можливі три варіанти планів:

- NV – плани, при яких об'єкти, що відмовили під час випробувань, новими не замінюються і не відновлюються;

- NR – плани, при яких об'єкти, що відмовили під час випробувань, замінюються новими (кількість випробовуваних зразків залишається постійною);
- NM – плани, при яких роботоздатність об'єкта після кожної відмови відновлюється.

Третій індекс в позначенні плану характеризує момент припинення випробувань. Якщо на випробування ставиться N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не замінюються і не відновлюються, то застосовуються такі плани:

- відмовили всі поставлені на випробування об'єкти – план $[NVN]$ (повністю визначена вибірка);
- план випробувань, згідно з яким одночасно випробовуються N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, випробування припиняють, коли число об'єктів, які відмовили, досягло r (план $[NVr]$);
- план випробувань, згідно з яким одночасно випробовуються N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюються і не замінюються, випробування припиняють після закінчення часу випробувань або напрацювання T для кожного об'єкта, який не відмовив (план $[NVT]$);
- комбінований план – випробування припиняються, коли число об'єктів, які відмовили, досягне r або після закінчення часу T – залежно від того, яка з цих умов виконана раніше (план $[NV(r, T)]$).

Аналогічно будуються плани для груп NR і NM . Для мікроелектронних приладів застосовуються плани групи NV . Розглянуті плани випробувань можуть застосовуватися не тільки для випробувань на надійність; такі плани можна застосувати й у тих випадках, коли випадкова величина має фізичний сенс, не пов'язаний з надійністю.

Очевидно, план $[NVN]$ є граничним як для плану $[NVT]$ при $T \rightarrow \infty$, так і для плану $[NVr]$ при $r \rightarrow N$. Об'єкт, який спостерігався і не мав відмов протягом певного часу t , а потім був виключений з числа спостережуваних, має напрацювання до відмови, що перевищує час t . Таке неповне спостереження називається цензуруванням. Іншими словами, *цензурування* – це подія, що приводить до припинення випробувань об'єкта до настання відмови.

Таким чином, скорочення тривалості випробувань приводить до цензурування даних. Додатковими причинами, що приводять до цензурування, можуть бути різночасовість початку і (або) закінчення випробувань, зняття з випробувань деяких виробів з організаційних причин або через відмови складових частин, надійність яких не досліджується. Цензурована вибірка – вибірка, елементами якої є значення напрацювання до відмови та напрацювання до цензурування (тобто напрацювання об'єкта від початку випро-

бувань до настання цензурування). Специфіка цензурування вибірки залежить від плану випробувань.

Задачі для розв'язування

Задача 5.1 Проводяться випробування комплектуючих мікроелектронних виробів, для яких $\alpha = \beta = 0,2$. Рівні ймовірності безвідмовної роботи задані значеннями: $P_0 = 0,96$, $P_1 = 0,92$. Час випробування $t = 15$ год. Вибрати план контролю, тобто визначити N та $r_{бр}$.

Задача 5.2 На випробування поставлено три прилади. Прилади, що відмовили під час випробувань, не відновлюються і не замінюються. В результаті отримано напрацювання до відмови: 450 год, 600 год, 1050 год. Визначити план випробувань і знайти середню інтенсивність відмов.

Задача 5.3 На випробування поставлено 50 технічних об'єктів. Об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюються і не замінюються, випробування припиняються в момент шостої відмови. В результаті отримано напрацювання повністю: 50 год, 150 год, 200 год, 300 год, 350 год і 450 год. Визначити план випробувань і знайти середню інтенсивність відмов.

Задача 5.4 На випробування поставлено 50 технічних об'єктів. Об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюються і не замінюються. За час випробувань не зареєстровано жодної відмови. Визначити план випробувань і знайти середню інтенсивність відмов.

Задача 5.5 На трьох стендах протягом 1000 год випробовуються вироби таким чином, що ті, які відмовили, негайно замінюються новими. В результаті випробувань зареєстровано дві відмови. Визначити план випробувань і знайти середню інтенсивність відмов.

Задача 5.6 Коефіцієнт випробування $K_{П} = 18$, кількість випробовуваних виробів $n = 150$, гарантована та середня інтенсивності відмов λ_r та λ_c дорівнюють відповідно 2,5 та 4,7 год⁻¹. Обчислити час та достовірність випробувань за умови недопустимості відмов для одноступеневого методу.

Задача 5.7 Коефіцієнт випробування $K_{П} = 15$, кількість випробовуваних виробів $n = 180$, гарантована та середня інтенсивності відмов λ_r та λ_c дорівнюють відповідно 2,3 та 5,4 год⁻¹. Обчислити час та достовірність випробувань для одноступеневого методу за умови допустимості однієї відмови для одноступеневого методу.

Контрольні запитання

1. Як поділяються випробування мікроелектронних приладів на надійність?
2. Назвіть фактори, які враховуються при організації випробувань приладів мікро- і наноелектроніки на надійність.
3. Які випробування на надійність відносяться до прискорених?
4. Як обчислюється коефіцієнт прискорення випробувань?
5. Які методи використовуються для прискорення випробувань на надійність?
6. Назвіть етапи форсування приладів, які розробляються вперше.
7. Які є типи планів контролю на надійність?
8. Як здійснюється одноступеневий контроль показників надійності за типом ймовірності?
9. Якими символами записуються плани випробувань на надійність?
10. Що являють собою ідеальна та реальна оперативні характеристики?

6 СТАНДАРТИЗАЦІЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

6.1 Основні означення та цілі стандартизації

Правильність, точність і наукова обґрунтованість означень в галузі стандартизації мають велике значення, тому що терміни, означення і поняття є основою нормативно-технічної, проектно-конструкторської та технологічної документації. В Україні упорядкування та стандартизацію термінології здійснює Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації та інформатики, Академія наук України та інші.

Стандартизація – діяльність, яка полягає у встановленні положень для загального і багаторазового застосування при вирішенні потенційних завдань з метою досягнення оптимального ступеня впорядкування у певній сфері, результатом якої є підвищення ступеня відповідності продукції, процесів та послуг їх функціональному призначенню і сприянню науково-технічному співробітництву.

Об'єкт стандартизації – предмети, продукція, процеси, технології, обладнання, системи, а також правила, поняття, означення, процедури, методи тощо.

Орган стандартизації – орган, що проводить стандартизацію, визначений на національному, регіональному чи міжнародному рівні, основними функціями якого є розроблення, ухвалення та затвердження стандартів.

Метою стандартизації в Україні є забезпечення безпеки життя та здоров'я людини, тварин, рослин, майна, а також охорона довкілля, створення умов для раціонального використання всіх видів національних ресурсів

та відповідності об'єктів стандартизації своєму призначенню, сприяння усуненню технічних бар'єрів у торгівлі.

Стандарти, застосовані під час виготовлення продукції, мають зберігатися у виробника протягом 10 років після випуску останнього виробу цього виду продукції.

Мета стандартизації – досягнення оптимального ступеня упорядкування в тій чи іншій галузі завдяки широкому та багаторазовому використанню встановлених положень, вимог, норм для вирішення реально існуючих, планованих або потенційних задач.

Основними результатами діяльності зі стандартизації повинні бути: підвищення ступеня відповідності продукту (послуги), процесів їх функціонального призначення; ліквідація технічних перешкод в міжнародному товарообігу; сприяння науково-технічному прогресу в різних галузях.

Цілі стандартизації можна підрозділити на загальні та вузькі, що стосуються забезпечення відповідності. *Загальні цілі* пов'язані з використанням тих вимог стандартів, що є обов'язковими. До цих вимог належить розробка норм та правил, що забезпечують: безпечність продукції, робіт, послуг для життя та праці людини, навколишнього середовища та майна; сумісність та взаємозамінність виробів; якість продукції, робіт та послуг згідно з рівнем науково-технічного прогресу; єдність вимірів; економію всіх видів ресурсів; безпеку господарчих об'єктів, пов'язану із можливістю виникнення різних катастроф (природного або техногенного характеру) або надзвичайних ситуацій; обороноздатність та мобілізаційну готовність країни.

Галузь стандартизації – сукупність взаємопов'язаних об'єктів стандартизації. Наприклад, мікроелектроніка є галуззю стандартизації, а об'єктами стандартизації в мікроелектроніці можуть бути технологічні процеси, мікроелектронні вироби, матеріали мікроелектронної техніки.

Принципи та методи стандартизації. Стандартизація як діяльність охоплює комплекс взаємопов'язаних подій, фактів у житті суспільства, які впливають на процес узагальнення та розробку нових нормативних документів, і забезпечує їх використання в матеріальній, культурній та торговій сферах діяльності.

Принцип плановості враховується при складанні перспективних і поточних планів з розробки нових і заміни застарілих стандартів. Планування робіт зі стандартизації невідривно пов'язане з планами розвитку народного господарства, тому що обсяги і спрямованість планів зі стандартизації визначаються завданнями і перспективою розвитку промисловості, сільськогосподарства та сфери обслуговування. До планів обов'язково вносяться основні завдання комплексної стандартизації, метрології та сертифікації, виконання яких контролюється Держстандартом України.

Принцип оптимальності полягає в тому, що розробка нових стандартів і нормативних документів має бути спрямована на врахування нових досягнень в науці, промисловості й раціоналізації, щоб законодавчо закріпити

оптимальні рішення в народному господарстві країни. Прийняті нові стандарти мають сприяти економії сировини, матеріальних, трудових, енергетичних ресурсів тощо.

Принцип перспективності полягає в тому, що нові стандарти мають враховувати підвищені норми та вимоги до об'єктів стандартизації і мають бути випереджаючими стандартами, враховувати новітні досягнення науки та техніки. Роботи зі стандартизації мають враховувати і закріплювати підвищені вимоги до якості продукції та послуг.

Принцип динамічності забезпечує проведення як планових, так і періодичних перевірок стандартів з метою внесення до них відповідних змін та своєчасного їх перегляду. Якщо ж стандарти не відповідають сучасним вимогам, то їх необхідно скасувати, щоб вони не заважали прогресивному розвитку.

Принцип системності визначає розробку стандартів як елемента системи і забезпечує упорядкування розроблених і взаємопов'язаних об'єктів стандартизації в єдину систему стандартизації.

Принцип обов'язковості полягає в тому, що розроблені і прийняті стандарти мають обов'язковий характер в державі і їх повинні дотримуватися всі підприємства й організації незалежно від форми власності.

У стандартизації застосовується уніфікація, агрегування, типізація – найпоширеніші методи, які забезпечують взаємозамінність і спеціалізацію на всіх рівнях діяльності.

Уніфікація – найбільш поширений та ефективний метод стандартизації, яким передбачається зведення об'єктів до однаковості і встановлення раціонального числа їх різновидів, наприклад, раціональне скорочення типів приладів або розмірів виробів однакового функціонального призначення (болти, гайки тощо). Уніфікація дає змогу знизити вартість виробів, підвищити серійність та рівень механізації і автоматизації виробничих процесів. Основою уніфікації є систематизація та класифікація виробів, процесів, функцій тощо.

Агрегування – це метод стандартизації, який полягає в утворенні виробів шляхом компонування їх з обмеженої кількості стандартних і уніфікованих деталей, вузлів, агрегатів, наприклад, складання приладів, двигунів, машин тощо.

Типізація – метод стандартизації, спрямований на розробку типових конструкцій, технологічних, організаційних та інших рішень на основі загальних технічних характеристик, наприклад, типові будівлі, типова технологія, типова структура управління тощо.

Взаємозамінність – це можливість використання одного виробу, вузла, агрегата чи послуги замість іншого подібного виробу, вузла, агрегата, не замінюючи їх функціонального призначення, наприклад, заміна старого двигуна автомашини новим тощо.

Спеціалізація – це організаційно-технічні заходи, спрямовані на створення виробництва для випуску однотипної продукції чи послуг в широ-

кому масштабі, наприклад, кондитерська фабрика для випуску цукерок, завод для випуску телевізорів, холодильників, годинників та інших виробів.

6.2 Нормативні документи зі стандартизації і види стандартів

У процесі стандартизації виробляються норми, правила, вимоги, характеристики, що стосуються об'єкта стандартизації, які оформляються у вигляді нормативного документа.

Закон «Про стандартизацію» дає таке означення нормативного документа.

Нормативний документ – це документ, що встановлює правила, загальні принципи або характеристики різних видів діяльності або їхніх результатів. Даний термін охоплює такі поняття як «стандарт», «кодекс ustalеної практики», «технічні умови».

Стандарт – документ, що встановлює для загального і багаторазового застосування правила, загальні принципи або характеристики, які стосуються діяльності чи її результатів, з метою досягнення оптимального ступеня впорядкованості у певній галузі, розроблений у встановленому порядку. Міжнародний та регіональний стандарти – стандарти, прийняті відповідно міжнародним та регіональними органами стандартизації.

Консенсус – загальна угода, що характеризується відсутністю серйозних заперечень щодо істотних питань у більшості зацікавлених сторін і досягається в процесі процедури, спрямованої на врахування думок усіх сторін і зближення різних точок зору.

Міжнародна стандартизація – стандартизація, що проводиться на міжнародному рівні та участь у якій відкрита для відповідних органів усіх країн.

Національна стандартизація – стандартизація, що проводиться на рівні однієї країни.

Державна стандартизація – стандартизація, яка проводиться державними органами, поширюється на всі підприємства держави, а результатом її здійснення є державний стандарт.

Кодекс ustalеної практики (звід правил) – документ, що включає практичні правила або процедури проектування, виготовлення, монтажу, технічного обслуговування, експлуатації обладнання, конструкцій і виробів. Кодекс ustalеної практики може бути стандартом, частиною стандарту або окремим документом.

Технічні умови – документ, що встановлює технічні вимоги, яким має відповідати продукція, процеси чи послуги. Технічні умови можуть бути стандартом, частиною стандарту чи окремим документом.

Технічний регламент – нормативно-правовий акт, прийнятий органом державної влади, що встановлює технічні вимоги до продукції, процесів

або послуг безпосередньо або через посилання на стандарти, або відбиває їх зміст.

В Україні діють такі нормативні документи (НД):

1. Міждержавні стандарти, керівні документи, рекомендації;
2. Національні стандарти України;
3. Республіканські стандарти колишньої УРСР, затверджені Держпланом колишньої УРСР або Міністерством економіки України до 1 серпня 1991 р.;
4. Керівні документи Держспоживстандарту України;
5. Державні класифікатори;
6. Галузеві стандарти (ОСТ) і технічні умови (ТУ) колишнього СРСР, затверджені до 1 січня 1992 р., термін дії яких продовжений, якщо вимоги цих НД не суперечать чинному законодавству України;
7. Стандарти організацій і галузеві стандарти України (СОУ, ГСТУ), зареєстровані Державним підприємством «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації і якості» (ДП «УкрНДНЦ»);
8. Технічні умови, зареєстровані територіальними органами Держспоживстандарту України – центрами стандартизації, метрології й сертифікації;
9. Нормативні документи центральних органів виконавчої влади України.

Позначення НД складається з індекса, цифрового позначення й відділених рискою двох останніх цифр року затвердження. Починаючи з 2000 року, рік затвердження НД проставляють повністю й відокремлюють двокрапкою.

6.3 Особливості застосування нормативних документів і характер їхніх вимог

Національні стандарти України розробляються на:

- організаційно-методичні і загально-технічні об'єкти, а саме: організацію і проведення робіт зі стандартизації, науково-технічну термінологію, класифікацію і кодування техніко-економічної і соціальної інформації, технічну документацію, інформаційні технології, організацію робіт з метрології;
- виробу загальномашинобудівного використання;
- банківсько-фінансову систему, транспорт, зв'язок, енергосистему, охорону навколишнього середовища, оборону держави;
- продукцію міжгалузевого призначення;
- продукцію для населення і народного господарства;
- методи випробувань.

Національні стандарти містять *обов'язкові* і *рекомендаційні* вимоги.

До обов'язкових відносяться:

- вимоги, що стосуються безпеки продукції для життя, здоров'я і майна громадян, охорони навколишнього середовища, і вимоги до методів випробування цих показників;
- вимоги техніки безпеки й охорони праці з посиланням на відповідні норми і правила;
- метрологічні норми, правила, вимоги і положення, що забезпечують вірогідність і єдність вимірювань;
- положення, що забезпечують технічну єдність при розробці, виготовленні, експлуатації або використанні продукції.

Обов'язкові вимоги національних стандартів підлягають безумовному виконанню на всій території України.

Рекомендаційні вимоги національних стандартів України підлягають безумовному виконанню, якщо:

- це передбачено чинними актами законодавства;
- ці вимоги включені в договори на розробку, виготовлення і постачання продукції;
- виробником (постачальником) продукції документально заявлено на відповідність продукції цим стандартам.

Як національні стандарти України використовуються державні стандарти колишнього Радянського Союзу і міждержавні стандарти – ГОСТ, згідно з рішенням Міждержавної ради по стандартизації, метрології і сертифікації в 1992 р., до якої входять країни СНД.

Стандарти організацій і галузеві стандарти розробляються на продукцію за відсутності національних (державних) стандартів України або в разі потреби установлення вимог, що перевищують або доповнюють вимоги національних стандартів.

Галузеві стандарти розробляються щодо продукції певної галузі. Їхні вимоги не повинні суперечити обов'язковим вимогам державних стандартів, а також правилам і нормам безпеки, установленим для галузі. Приймають такі стандарти державні органи управління (наприклад, міністерства), що несуть відповідальність за відповідність вимог галузевих стандартів обов'язковим вимогам ДСТУ.

Об'єктами галузевої стандартизації можуть бути: продукція, процеси і послуги, застосовувані в галузі; правила, що стосуються організації робіт з галузевої стандартизації; типові конструкції виробів галузевого застосування (інструменти, кріпильні деталі тощо); правила метрологічного забезпечення в галузі. Діапазон застосовності галузевих стандартів обмежується підприємствами, підвідомчими державному органу управління, що прийняли даний стандарт. На добровільній основі можливе використання цих стандартів суб'єктами господарської діяльності іншого підпорядкування. Ступінь обов'язковості дотримання вимог стандарту галузі визначається тим підприємством, що застосовує його, або за договором між виго-

товлювачем і споживачем. Контроль за виконанням обов'язкових вимог організовує відомство, що прийняло даний стандарт.

Стандарти підприємств розробляються і приймаються самим підприємством. Об'єктами стандартизації в цьому випадку зазвичай є складові організації й управління виробництвом, удосконалювання яких – головна мета стандартизації на даному рівні. Крім того, стандартизація на підприємстві може стосуватися і продукції, виробленої цим підприємством. Тоді об'єктами стандарту підприємства будуть складові частини продукції, технологічне оснащення й інструменти, загальні технологічні норми процесу виробництва цієї продукції. Стандарти підприємств можуть містити вимоги до різного роду послуг внутрішнього характеру.

Стандарти громадських об'єднань (наукових, науково-технічних, інженерних товариств та інші). Ці нормативні документи розробляють, як правило, на принципово нові види продукції, процесів або послуг; передові методи випробувань, а також нетрадиційні технології і принципи управління виробництвом. Громадські об'єднання, що займаються цими проблемами, мають на меті поширення через свої стандарти перспективних результатів і світових науково-технічних досягнень, фундаментальних і прикладних досліджень, що заслуговують на увагу.

Відповідно до специфіки об'єкта стандартизації пропонується розрізняти такі види стандартів: основоположні, на продукцію і послуги, на процеси, на методи контролю (випробування, вимірювання, аналізу).

Основоположний стандарт – нормативний документ, що містить загальні або керівні положення для певної області.

Термінологічний стандарт, у якому об'єктом стандартизації є терміни. Такий стандарт містить означення (тлумачення) терміна, приклади його застосування тощо.

Стандарт на методи випробування встановлює методики, правила, процедури різних випробувань і поєднаних з ними дій (наприклад, добір проби або зразка).

Стандарт на продукцію містить вимоги на продукцію, що забезпечують відповідність продукції її призначенню. Цей стандарт може бути повним або неповним. Повний стандарт встановлює не тільки вищевказані вимоги, але також і правила добору проб, проведення випробувань, упакування, етикетування, зберігання тощо. Неповний стандарт містить частину вимог до продукції (тільки до параметрів якості, тільки до правил постачання тощо).

Стандарт на процес, стандарт на послугу – це нормативні документи, у яких об'єктом стандартизації виступають відповідно процес (наприклад, технологія виробництва), послуга.

Основоположні стандарти розробляються з метою сприяння, взаєморозуміння, технічної єдності і взаємозв'язку діяльності в різних областях науки, техніки і виробництва. Цей вид нормативних документів установлює такі організаційні принципи і положення, вимоги, правила і норми, що роз-

глядаються як загальні для цих сфер і повинні сприяти виконанню цілей, загальних як для науки, так і для виробництва.

Стандарти на продукцію (послуги) установлюють вимоги або до конкретного виду продукції (послуги), або до угрупувань однорідної продукції (послуги). У вітчизняній практиці є два різновиди цього виду нормативних документів:

- стандарти загальних технічних умов, що містять загальні вимоги до угрупувань однорідної продукції, послуг;
- стандарти технічних умов, що містять вимоги до конкретної продукції (послуги).

Стандарт загальних технічних умов зазвичай містить такі розділи: класифікацію, основні параметри (розміри), загальні вимоги до параметрів якості, упакування, маркування; вимоги безпеки; вимоги охорони навколишнього середовища; правила приймання продукції тощо.

Стандарт технічних умов установлює усебічні вимоги до конкретної продукції, що стосується виробництва, споживання, постачання, експлуатації, ремонту, утилізації. Суть цих вимог – суперечити стандартам загальних технічних умов. Але стандарт технічних умов містить конкретизовані додаткові вимоги, що відносяться до об'єкта стандартизації. Стандарти технічних умов на послугу можуть містити вимоги до асортименту наданих послуг.

Стандарти на роботи (процеси) установлюють вимоги до конкретних видів робіт, що здійснюються на різних стадіях життєвого циклу продукції: розробки, виробництва, експлуатації (споживання), зберігання, транспортування, ремонту, утилізації. Зокрема, такі стандарти можуть містити вимоги до методів автоматизованого проектування продукції, модульного конструювання тощо. При проведенні технологічних операцій стандартизації підлягають гранично допустимі норми різного роду впливів технології на природне середовище.

Стандарти на методи контролю (випробування, вимірювання, аналізу) рекомендують застосовувати методики контролю, що забезпечують найбільшою мірою об'єктивність оцінки обов'язкових вимог до якості продукції, які наведені в стандарті на цю продукцію.

6.4 Державна та відомча служби стандартизації

До органів державної служби стандартизації належать:

- центральний орган виконавчої влади в сфері стандартизації – Держспоживстандарт України;
- рада стандартизації;
- технічні комітети стандартизації;
- інші суб'єкти, що займаються стандартизацією.

Держспоживстандарт організує, координує, проводить діяльність із розроблення, узгодження, перегляду, заміни, поширення національних стандартів і як національний орган стандартизації представляє Україну в міжнародних і регіональних організаціях зі стандартизації.

Рада стандартизації – це колегіальний консультативно-дорадчий орган при Кабінеті Міністерств України. Рада формується на паритетних засадах із представників органів виконавчої влади, Держспоживстандарту, суб'єктів господарювання, Національної академії наук України, спеціалізованих академії наук і відповідних громадських організацій.

Основною метою діяльності ради стандартизації є налагодження взаємодії між виробниками, споживачами продукції й органами державної влади, узгодження інтересів в галузі стандартизації, сприяння розвитку стандартизації.

Рада реалізує і розробляє пропозиції щодо:

- утворення технічних комітетів стандартизації і визначення напрямків їхньої діяльності;
- прийняття міжнародного, регіонального й іншого стандарту як національного;
- проведення експертиз проєктів технічних регламентів і інших нормативних документів з питань технічного регулювання.

Технічні комітети стандартизації створюються Держспоживстандартом, на них покладені функції із розробки, розгляду й узгодження міжнародних (регіональних) і національних стандартів. До роботи в технічних комітетах залучаються на добровільних засадах уповноважені представники органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, суб'єктів господарювання і їхніх об'єднань, науково-технічних та інженерних товариств (союзів), об'єднань (союзів) споживачів, відповідних громадських організацій, провідні (відомі) вчені і фахівці.

Значну роль у наблизенні якості й безпеки нашого життя та продукції до європейського й світового рівня відіграють українські *технічні комітети* (ТК), які безпосередньо створюють погоджену систему нормативних документів (НД), розробляючи національні стандарти й впроваджуючи на національному рівні, шляхом гармонізації, пріоритетні європейські й міжнародні стандарти.

ТК є основною ланкою, що поєднує потреби сучасного виробництва в нових стандартах відповідно до міжнародних вимог і забезпечує їх погодженість із національними інтересами. Тепер в Україні функціонує 148 ТК у різних областях і сферах діяльності, секретаріати яких ведуть організації, установи, вищі навчальні заклади, науково-дослідні, проектно-конструкторські інститути та науково-виробничі об'єднання різного підпорядкування. У системі Держспоживстандарту функціонує 14 ТК, 8 з них – у державних центрах стандартизації й метрології, 6 – у наукових устано-

Інші суб'єкти, що займаються стандартизацією – це місцеві органи виконавчої влади й органи місцевого самоврядування, суб'єкти господарювання та їхні об'єднання, відповідні громадські організації, що у межах своїх повноважень, установлених законом, виконують роботи із розробки, узгодження, перегляду, заміни стандартів відповідного рівня, можуть передавати в Держспоживстандарт пропозиції щодо створення технічних комітетів стандартизації і розробки стандартів або прийняття як національних стандартів міжнародних (регіональних) або власних стандартів, а також ведуть іншу роботу в галузі стандартизації.

До органів *галузевої служби стандартизації* належать:

- служба стандартизації міністерства або відомства;
- головні (базові) організації зі стандартизації;
- служба стандартизації підприємства (організації).

Служба стандартизації міністерства або відомства здійснює керівництво й організацію діяльності з питань стандартизації в галузях народного господарства. На відділ стандартизації міністерства або відомства покладено організацію і планування робіт зі створення проектів державних і галузевих стандартів на проектування і виготовлення продукції, а також організації найбільш важливих наукових досліджень зі стандартизації для забезпечення випуску продукції високої якості.

Головні (базові) організації зі стандартизації здійснюють проведення науково-дослідних робіт і розробку нормативних документів зі стандартизації, як правило, галузевого рівня.

Служба стандартизації підприємства (організації) організовує і проводить роботу зі стандартизації. Це може бути відділ (на великому підприємстві або об'єднанні), група або навіть відповідальний за стандартизацію.

Керівник служби стандартизації несе відповідальність нарівні з керівником підприємства за дотримання стандартів і технічних умов у технічній документації, що розроблена підприємством, за відповідність їх сучасному рівню техніки, за своєчасний перегляд стандартів і технічних умов з метою приведення їх у відповідність зі зростаючими вимогами народного господарства.

6.5 Порядок використання стандартів та нагляд за їх дотриманням

Впровадження стандартів повинно бути закінчено до дати настання його дії. Стандарт вважається впровадженим на підприємстві (організації), якщо встановлені ним вимоги дотримуються відповідно до його сфери дії і забезпечується стабільність якості виготовленої продукції. Впровадження стандарту здійснюється відповідно до плану основних організаційних заходів, що залежно від виду стандарту містить:

- перегляд, внесення або скасування діючих і розробку нормативно-технічних документів, що пов'язані зі змістом впроваджуваного стандарту;

- розробку нової технічної документації і внесення змін у чинну документацію;
- забезпечення підприємства необхідною сировиною, матеріалами, напівфабрикатами і комплектуючими засобами, а також устаткуванням, пристроями, інструментами, необхідними для випуску нової продукції;
- зміну технологічних процесів, режимів роботи, автоматизацію і механізацію виробничих процесів, підвищення точності виготовлення продукції;
- реконструкцію, розширення, будівництво нових виробничих потужностей і організацію спеціалізованих виробництв;
- підвищення кваліфікації, підготовку кадрів та інші заходи, що необхідні для впровадження стандарту.

Державний нагляд – це діяльність спеціально уповноважених органів виконавчої влади з контролю за дотриманням суб'єктами підприємницької діяльності стандартів, норм і правил при виробництві і випуску продукції (виконання робіт, надання послуг) з метою забезпечення інтересів суспільства і споживачів, її необхідної якості, безпечної для життя, здоров'я, майна і навколишнього середовища.

Керівник підприємства зобов'язаний створити необхідні умови для перевірки, а саме: підписати наказ про допуск до перевірки приміщення, виділити транспорт, надавати необхідну документацію.

У розділі «Причини порушень вимог стандартів, норм і правил» визначаються вимоги нормативно-технічних документів, вказуються конкретні причини, що призвели до випуску продукції з порушенням вимог стандартів, норм і правил.

Ними можуть бути:

- недоліки розробки (проектування) продукції;
- недоліки підготовки виробництва;
- незабезпечення підприємства нормативними документами;
- відсутність необхідних умов для вимірювань і випробувань продукції;
- низька якість сировини, матеріалів, напівфабрикатів, складових частин і готових виробів;
- незадовільна організація контролю технологічного процесу і контролю за станом технологічного устаткування;
- порушення технологічної дисципліни при виробництві продукції, що перевіряється;
- невідповідність використання нормативних документів вимогам діючих стандартів;
- порушення метрологічних норм і правил;
- недоліки конструкторської, технологічної документації;
- незадовільний стан устаткування, інструментів, оснащення;

- незадовільне збереження сировини, матеріалів, напівфабрикатів, складових частин і готових виробів.

Держнагляд на конкретному підприємстві починається з того, що *контроль якості продукції і її відповідність вимогам стандартів проводиться в такому порядку:*

- відбираються контрольні проби з числа тих, що були прийняті відділом технічного контролю;
- проводять випробування відібраних виробів за всіма показниками до чинних стандартів;
- у цехах перевіряється дотримання режимів технологічних процесів, стан засобів вимірювання, робота відділу технічного контролю;
- перевіряється дотримання стандартів на матеріали і комплектуючі напівфабрикати, що отримані від суміжників.

6.6 Нормоконтроль технічної документації

Технічні документи (конструкторські і технологічні) повинні відповідати ряду вимог. Найбільш важливі з них:

- вимоги до конструкції, що визначають її раціональність, взаємозв'язок елементів, вартість вибору матеріалу, характер оброблення;
- вимоги до технології, що визначають можливість використання для виробництва виробів найбільш прогресивних та економічних технологічних процесів і обладнання;
- вимоги до оформлення, що визначають чіткість та наочність зображення на кресленні всіх відомостей, необхідних для виготовлення деталі або виробу.

Щоб розроблювана в процесі проектування технічна документація задовольняла перераховані вище вимоги, необхідний постійний, добре організований контроль – як конструкторський і технологічний, так і нормативний (*нормоконтроль*).

Мета нормоконтролю – повне дотримання в технічних документах вимог чинних стандартів, широке використання у výroбах при проектуванні стандартних та уніфікованих елементів.

Здійснення нормоконтролю обов'язкове для всіх організацій і підприємств, що виконують проектно-конструкторські роботи, незалежно від їхньої відомчої підпорядкованості. Нормоконтролю підлягає така конструкторська документація: текстові документи (пояснювальна записка, інструкції, технічний опис та умови), креслення та інша конструкторська документація. При нормоконтролі технологічної документації перевіряються карти технологічних процесів, дотримання технологічних нормативів, технологічні креслення.

Нормоконтроль -- один із завершальних етапів створення технічної документації, значення якого з розвитком стандартизації постійно зростає. Права і обов'язки працівників нормоконтролю на підприємстві визначаються відповідним положенням і наказом по підприємству. Вказівки нормоконтролера обов'язкові для виконання. Його рішення можуть бути скасовані головним інженером або директором.

Технічна документація, що не має підпису нормоконтролера, не приймається до подальшої роботи.

Життєвий цикл мікро- і напoeлектронних приладів починається із складання та погодження між споживачем та розробником *технічних вимог* на дані вироби. В технічних вимогах (ТВ) вказуються основні параметри якості: електричні параметри, вимоги до конструкції, параметри надійності.

При рівні уніфікації виробу 20–60% відбувається виконання *науково-дослідної роботи* (НДР). Основні етапи НДР:

- складання та погодження технічного завдання (ТЗ); в ТЗ вказуються параметри технічних вимог, вимоги нормативних документів (стандарти ISO, ГОСТи, ОСТи, ДСТУ), а також вимоги для мікроелектронних приладів, які не в повному обсязі вказані в ТВ; ТЗ погоджується з усіма зацікавленими організаціями;
- розробка конструкції та технологічного процесу виготовлення мікроелектронних приладів; за необхідності розробляється нове технологічне обладнання, яке дозволить забезпечити необхідну якість виробу; як правило, на цьому етапі проводяться технологічні розрахунки, підтвердження можливості отримання мікро- і напoeлектронних приладів;
- виготовлення експериментального зразка;
- виготовлення дослідної партії (кілька зразків);
- проведення пілотних (не в повному обсязі) випробувань, які можуть показати відповідність якості виробу ТЗ.

НДР може закінчитись негативним результатом.

Після НДР відбувається виконання *дослідно-конструкторської роботи* (ДКР). Для ДКР використовують результати НДР.

Основні етапи ДКР:

- розробка та погодження ТЗ; в ТЗ вказується весь обсяг технічних вимог до виробу відповідно до НДР; ТЗ погоджується та затверджується;
- розробляється конструкторська документація на виріб згідно з ТВ;
- розробляються технологічні процеси, які забезпечують отримання конструкторських вимог за КД (конструкторська документація);
- розробляється технічна документація;

- виготовляється необхідний інструмент та оснащення; вимірювальна та випробувальна техніка та обладнання; виготовляється дослідна партія виробів; виконують пілотну перевірку відповідності мікроелектронних приладів КД та ТЗ;
- розробляється проект ТУ як частина КД;
- виготовляється контрольна партія виробів обсягом від 200 до 1000 шт.; проводиться весь комплекс перевірки якості мікроелектронних приладів на відповідність проекту ТУ, включаючи весь комплекс випробовувань; при позитивних результатах затверджується комісіями ТУ та КД.

Технічні умови (ТУ) є найбільш розповсюдженим видом нормативних документів.

ТУ розробляються на продукцію, для якої відсутні державні та галузеві стандарти, або за необхідності доповнення чи посилення вимог, а також на продукцію, що випускається дрібними партіями на замовлення або за контрактами, і вироби, що випускаються на основі нових рецептур і технологій.

Технічні умови (ТУ) – документ, що установлює вимоги до конкретної продукції, послуги і регулює відносини між постачальником (розробником) і споживачем (замовником) продукції, послуги.

Зазвичай ТУ розробляються виробником і містять:

- вступну частину;
- технічні вимоги до сировини та фізико-хімічні показники продукції;
- вимоги безпеки та охорони навколишнього середовища;
- правила приймання;
- методи контролю;
- правила транспортування та зберігання;
- маркування;
- гарантії постачальника.

Вимоги ТУ і зміни до них не повинні суперечити обов'язковим вимогам стандартів, що поширюються на цю продукцію. Затверджує ТУ підприємство-виготовлювач за узгодженням з органами охорони здоров'я, замовником тощо.

Контрольні запитання

1. Дайте означення поняття "стандартизація". Що є об'єктом стандартизації?
2. Назвіть основні принципи стандартизації.
3. Назвіть основні нормативні документи, які діють в Україні.
4. Який документ називається "технічні умови"? Які розділи він містить?

5. Охарактеризуйте обов'язкові та рекомендаційні вимоги національних стандартів України.
6. Що відноситься до об'єктів галузевої стандартизації?
7. Які ограні належать до державної служби стандартизації?
8. Назвіть основні етапи контролю якості продукції і її відповідність вимогам стандартів.
9. Назвіть основні вимоги до технічних документів.
10. Що вказується в технічних вимогах до мікроелектронних приладів?
11. Які документи підлягають нормоконтролю?

7 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

7.1 Лабораторна робота № 1

Статистична обробка емпіричних даних та визначення показників надійності невідновлюваних виробів

Мета роботи: набуття навичок роботи з характеристиками випадкових величин та показниками надійності невідновлюваних виробів.

Порядок виконання роботи

1. З таблиці 7.1 відповідно до варіанта вибрати 40 значень часу напрацювання виробів до відмови.
2. З таблиці 7.2 відповідно до варіанта вибрати значення часу контролю t_{k1} та t_{k2} .
3. Для вибраного простого статистичного ряду значень випадкової величини (ряд 1) необхідно визначити оцінку математичного сподівання (середнє напрацювання до відмови), дисперсію, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації за формулами 1.14, 1.19, 1.22 та 1.23, відповідно.
4. Упорядкувати вибраний ряд тривалостей безвідмовної роботи за зростанням. Для впорядкованого дискретного варіаційного ряду визначити моду, медіану (за формулою 1.16 або 1.17); ліміти t_{min} та t_{max} ; розмах варіації (за формулою 1.10); ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови виробу для t_{k1} і t_{k2} за формулами 2.15 та 2.16, відповідно; щільність ймовірності відмови в інтервалі часу $\Delta t = t_{k2} - t_{k1}$ за формулою 2.17; інтенсивність відмов в інтервалі часу $\Delta t = t_{k2} - t_{k1}$ за формулою 2.18.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

№ завд.	Вар. 1 t_b тис. год	Вар. 2 t_b тис. год	Вар. 3 t_b тис. год	Вар. 4 t_b тис. год	Вар. 5 t_b тис. год	Вар. 6 t_b тис. год	Вар. 7 t_b тис. год	Вар. 8 t_b тис. год	Вар. 9 t_b тис. год	Вар. 10 t_b тис. год
1	7	12	35	71	55	32	46	77	44	71
2	10	25	26	66	53	21	20	79	23	66
3	50	13	45	67	15	64	8	54	70	22
4	12	17	24	49	3	70	66	37	61	35
5	25	12	71	55	21	75	21	20	23	36
6	13	20	66	53	32	46	78	43	35	28
7	17	33	67	15	21	20	79	45	36	48
8	12	12	49	3	64	8	54	24	28	40
9	20	22	55	23	70	66	37	71	48	70
10	33	34	53	32	75	21	20	60	40	71
11	37	37	15	18	46	78	26	22	70	66
12	22	26	3	64	20	79	45	35	71	08
13	34	45	23	70	8	54	24	36	62	10
14	37	24	32	75	1	37	71	28	08	15
15	26	71	15	46	21	20	64	48	10	12
16	45	66	64	20	78	26	22	40	15	17
17	24	67	70	8	79	45	35	70	12	35
18	71	49	75	1	54	24	36	71	17	71
19	66	55	46	18	37	71	28	62	08	66
20	67	53	20	78	20	66	48	08	18	70
21	49	58	8	79	26	22	40	10	03	35
22	55	3	1	54	45	35	70	15	02	36
23	53	23	15	37	24	36	71	12	43	28
24	58	32	78	20	71	28	64	17	44	48
25	3	15	79	26	66	48	08	08	27	40
26	23	64	54	45	22	40	10	18	12	32
27	32	70	37	24	35	70	15	03	17	15
28	15	75	20	71	36	71	12	02	73	64
29	64	46	26	66	28	66	17	43	78	70
30	70	20	45	22	48	08	08	15	31	75
31	75	8	24	35	40	10	18	27	08	46
32	46	12	71	36	70	15	03	12	31	20
33	20	15	66	28	71	12	02	17	48	8
34	8	78	22	48	66	17	01	73	40	1
35	1	79	35	40	08	08	15	64	70	15
36	15	54	36	70	10	18	27	73	71	78
37	78	37	28	71	15	03	12	64	66	79
38	79	77	48	66	12	02	17	43	44	54
39	54	41	40	08	17	01	73	07	10	37
40	37	13	74	18	35	15	64	01	15	32

Таблиця 7.2 – Вихідні дані. Час контролю

	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5	Вар. 6	Вар. 7	Вар. 8	Вар. 9	Вар. 10
t_{k1} , тис. год	30	20	15	25	20	20	30	20	30	15
t_{k2} , тис. год	60	70	40	55	55	60	65	65	70	50

5. На основі впорядкованого ряду утворити інтервальний варіаційний ряд, подати його у вигляді таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Інтервальний ряд випадкової величини

Номер інте- рвалу	Нижня межа, t_{min}	Верхня межа, t_{max}	Середнє значення, $t_{сep}$	Частота появи, f	Накопичена частота, S
1					
2					
...					
k					

Для цього необхідно визначити кількість інтервалів k за формулою 1.9, ширину інтервалів за формулою 1.11 та визначити верхні та нижні межі інтервалів.

Обчислити накопичену частоту інтервалу – це число, отримане послідовним підсумовуванням частот у напрямку від першого інтервалу до останнього, до того інтервалу включно, для якого визначається накопичена частота. Накопичені частоти позначено S .

6. Побудувати гістограму для інтервального варіаційного ряду, отриманого в п. 5.

7. Інтервальний варіаційний ряд умовно замінити дискретним варіаційним рядом, прийнявши значення випадкової величини рівним середньому значенню кожного інтервалу. Для одержаного ряду побудувати полігон розподілу.

8. Для дискретного варіаційного ряду, отриманого в п. 7 визначити:

- оцінку математичного сподівання (середнє напрацювання до відмови)

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k t_{сep_i} f_i}{\sum_{i=1}^k f_i}; \quad (7.1)$$

- моду за виразом

$$M_0 = t_0 + h \frac{f_2 - f_1}{(f_2 - f_1) + (f_2 - f_3)}, \quad (7.2)$$

де t_0 – початок модального інтервалу,

h – величина інтервалу,

f_1 – передмодальна частота,

f_2 – частота, що відповідає модальному інтервалу,

f_3 – післямодальна частота;

як модальний інтервал вибираємо інтервал з найбільшою частотою;

- медіану за виразом

$$M_e = t_{Me} + h \frac{\sum_{i=1}^k f_i / 2 - S_{Me-1}}{f_{Me}}, \quad (7.3)$$

де t_{Me} – нижня границя медіанного інтервалу (перший інтервал, накопичена частота S якого перевищує половину загальної суми частот);

f_{Me} – частота медіанного інтервалу;

S_{Me-1} – сума накопичених частот до медіанного інтервалу;

- ліміти та розмах варіації за формулою 1.10;
- дисперсію за виразом

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^k |t_{cep} - X_{cp}|^2 \cdot f_i}{\sum_{i=1}^k f_i}; \quad (7.4)$$

- середнє квадратичне відхилення;
- коефіцієнт варіації;
- ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови виробу протягом часу t_{k1} і t_{k2} ;
- щільність ймовірності відмови в інтервалі часу $\Delta t = t_{k2} - t_{k1}$;
- інтенсивність відмов в інтервалі часу $\Delta t = t_{k2} - t_{k1}$.

9. Одержані результати внести до таблиць 7.4 та 7.5 (див. зразки).

10. Зробити висновок щодо точності та трудомісткості розрахунку статистичних параметрів та розрахунку показників надійності для дискретного та інтервального рядів.

Таблиця 7.4 – Статистичні параметри випадкової величини

Параметр	Позначення	Ряд № 1	Ряд № 2
Оцінка мат. сподівання	M_t		
Мода	M_o		
Медіана	M_e		
Верхній ліміт	t_{max}		
Нижній ліміт	t_{min}		
Розмах варіації	Δt		
Дисперсія	D_t		
Сер. кв. відхилення	S_t		
Коефіцієнт варіації	V_t		

Таблиця 7.5 – Показники надійності невідновлюваних виробів

Номер ряду	$P(t_{k1})$	$P(t_{k2})$	$Q(t_{k1})$	$Q(t_{k2})$	$f(\Delta t)$	$\lambda(\Delta t)$
1						
2						

Контрольні запитання

1. Наведіть приклади випадкових параметрів, що впливають на надійність приладів мікро- та наноелектроніки.
2. На які два основні види поділяють всі випадкові величини? В чому полягає різниця між ними?
3. Дайте означення інтервального варіаційного ряду. Для яких випадкових величин його будують?
4. Дайте означення математичного сподівання випадкової величини та його оцінки.
5. Дайте означення моди та медіани випадкової величини. Для якого ряду значень випадкової величини можна визначити ці показники? Який ряд називають бімодальним?
6. Запишіть вирази для визначення розмаху варіації, середнього, стандартного відхилення та дисперсії.
7. Що таке ймовірність відмови виробу та як її визначити, маючи статистичні дані про напрацювання групи виробів до відмови?
8. Що таке інтенсивність відмов? Запишіть вираз для її визначення.

7.2 Лабораторна робота № 2

Показники і параметри надійності при відмовах типу зносу

Мета роботи: набуття навичок роботи з параметрами та характеристиками виробів в процесі випробувань на довговічність при відмовах типу зносу.

1. З таблиці 7.6 відповідно до варіанта вибрати значення часу напрацювання t_i , кількості виробів, що відмовили в i -ті проміжки часу $n(\Delta t)$, та значення N загальної кількості виробів, що спостерігаються.

Таблиця 7.6 – Витяг з протоколу ресурсних випробувань мікроелектронних приладів

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вар.1 N=90 шт.	t_i , тис. год	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	0	1	0	1	2	4	8	14	11
Вар. 2 N=95 шт.	t_i , тис. год	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	0	1	1	2	5	13	15	12	9
Вар. 3 N=90 шт.	t_i , тис. год	8	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	0	1	3	1	4	7	11	9
Вар. 4 N=85 шт.	t_i , тис. год	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	3	2	5	10	12	11	8	7
Вар. 5 N=95 шт.	t_i , тис. год	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	0	2	4	6	9	10	15	12
Вар. 6 N=70 шт.	t_i , тис. год	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	0	1	1	3	5	9	14	12	8
Вар. 7 N=75 шт.	t_i , тис. год	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	0	1	3	6	6	8	13	11	9
Вар. 8 N=70 шт.	t_i , тис. год	8	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	0	1	2	5	9	12	16	13
Вар. 9 N=90 шт.	t_i , тис. год	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	0	1	3	7	10	16	14	11
Вар. 10 N=90 шт.	t_i , тис. год	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$n(\Delta t)$, шт.	0	0	0	1	0	2	3	4	7	11	15	12

2. За результатами протоколу подовжених випробувань на довговічність дослідити поведінку мікроелектронних виробів шляхом побудови

графіків функцій $P(t_i)$ та $f(t_i)$ у вигляді гістограм. Для цього необхідно:

- розрахувати показник надійності $P(t_i)$ за формулою 2.15 та оформити результати у вигляді таблиці 7.7;
- побудувати графік функції $P(t_i)$ у вигляді гістограми, при цьому висота стовпця пропорційна значенню показника надійності, а ширина – періодичності контролю; оскільки момент відмови конкретного виробу невідомий, то вважають, що всі виявлені непридатні вироби відмовили в момент часу $t_{i,l} + \Delta t/2$, і тому початок відповідного стовпця гістограми повинен розташовуватись в точці t_{i-1} ;

Зразок таблиці

Таблиця 7.7 – Результати відмов досліджуваних приладів

№ досліджу	t_i , тис. год	$n(\Delta t)$, шт.	n_i , шт.	$N_i = N - n_i$, шт.	$P(t)$	$f(t)$
1						
2						
...						
k						

- оскільки обсяг виробів, поставлених на випробування невеликий, то точність обчисленого за даними випробувань показника надійності також буде невисокою, тому для збільшення точності потрібно провести згладжувальну криву (як експериментальні точки потрібно вважати середину верхнього ребра кожного прямокутника гістограми);
 - розрахувати показник надійності $f(t_i)$ за формулою 2.13 та оформити результати у вигляді таблиці 7.7;
 - побудувати графік функції $f(t_i)$ у вигляді гістограми та провести згладжувальну криву.
3. Визначити середній час напрацювання до відмови, скориставшись:
- виразом 2.19, де t_{0i} – напрацювання до відмови i -го приладу, як $\Delta t = t_{k2} - t_{k1}$;
 - згладженим графіком $P(t_i)$ на рівні 0,5 або в точці максимуму графіка $f(t_i)$, оскільки для визначення середнього часу напрацювання до відмови випробування продовжують до відмови 50% випробовуваних виробів, правда це є медіанне значення, але для симетричного закону розподілу, яким є нормальний закон, медіана збігається з математичним сподіванням, тому час відмови 50% виробів є середнім напрацюванням до відмови.
4. Визначити гамма-90% напрацювання за допомогою графіка $P(t_i)$.

5. Зробити висновки, враховуючи, що результатом дослідження поведінки виробів при ресурсних випробуваннях повинен бути підбір теоретичного закону розподілу, що найточніше описує експериментальні дані, зокрема час напрацювання до відмови.

Контрольні запитання

1. Назвіть показники надійності для виробів з відмовами типу зносу.
2. Що таке ймовірність відмови виробу та як її визначити?
3. Що таке ймовірність безвідмовної роботи виробу та як її визначити?
4. Дайте означення гамма-відсотковому напрацюванню. Які стандартні рівні цієї величини використовуються для приладів мікроелектроніки?
5. Нормальний закон розподілу та його параметри.
6. Як визначається середнє напрацювання до відмови?
7. Як визначаються показники надійності за експериментальними даними?
8. Опишіть методику проведення ресурсних випробувань.

7.3 Лабораторна робота № 3

Визначення кількісних характеристик надійності при відмовах з постійною інтенсивністю

Мета роботи: набуття навичок роботи під час визначення кількісних характеристик надійності за статистичними даними про відмови виробів в процесі ресурсних випробувань при відмовах з постійною інтенсивністю.

Порядок виконання роботи

1. З таблиці 7.8 відповідно до варіанта вибрати значення часу напрацювання t_i , кількості виробів, що відмовили в i -ті проміжки часу $n(\Delta t)$ та значення N загальної кількості виробів, що спостерігаються.

Таблиця 7.8 – Витяг з протоколу ресурсних випробувань мікроелектронних приладів

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вар.1 $N=60$ шт.	t_i тис. год	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
	$n(\Delta t)$, шт.	3	2	0	1	0	0	1	1	1	0	1	2
Вар. 2 $N=65$ шт.	t_i тис. год	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$n(\Delta t)$, шт.	4	3	2	1	0	0	1	0	0	1	2	5

Продовження таблиці 7.8

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вар. 3 $N=70$ шт.	t_b тис. год	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
	$n(\Delta t)$, шт.	3	2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	3
Вар. 4 $N=75$ шт.	t_b тис. год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	$n(\Delta t)$, шт.	2	2	1	1	0	0	1	0	1	0	1	3
Вар. 5 $N=80$ шт.	t_b тис. год	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
	$n(\Delta t)$, шт.	4	2	1	1	0	1	0	1	1	0	1	2
Вар. 6 $N=85$ шт.	t_b тис. год	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$n(\Delta t)$, шт.	4	3	2	1	0	0	1	0	0	1	2	5
Вар. 7 $N=90$ шт.	t_b тис. год	7	14	21	27	35	42	49	56	63	70	77	84
	$n(\Delta t)$, шт.	3	2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	3
Вар. 8 $N=95$ шт.	t_b тис. год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	$n(\Delta t)$, шт.	2	2	1	1	0	0	1	0	1	0	1	3
Вар. 9 $N=90$ шт.	t_b тис. год	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96
	$n(\Delta t)$, шт.	4	2	1	1	0	1	0	1	1	0	1	2
Вар. 10 $N=95$ шт.	t_b тис. год	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
	$n(\Delta t)$, шт.	5	2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	3

2. Розрахувати показники $P(t_i)$ та $Q(t_i)$ та побудувати графіки функцій у вигляді гістограми та провести згладжені криві. Для побудови слід керуватися методичними вказівками до лабораторної роботи № 2. Результати розрахунку занести до таблиці (зразок 7.9).

3. Розрахувати показник $f(t_i)$ та побудувати графік функції. Для побудови слід керуватися методичними вказівками до лабораторної роботи № 2. Результати розрахунку занести до таблиці (зразок 7.9).

4. Розрахувати $\lambda(t_i)$, використавши формулу 2.18, та побудувати графік функції. Результати розрахунку занести до таблиці (зразок 7.9).

Визначити середню інтенсивність відмов на ділянці стабілізації графіка (друга ділянка).

Зразок таблиці

Таблиця 7.9 – Результати відмов досліджуваних приладів

№ досліджу	t_i , тис. год	$n(\Delta t)$, шт.	n_i , шт.	$N_i = N - n_i$, шт.	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
1								
2								
...								
k								

5. Побудувати графіки функцій $P(t)$, $Q(t)$ та $f(t)$ за аналітичними виразами 3.1, 3.2 та 3.3, відповідно.

6. Визначити гамма-90% напрацювання (t_γ) кількома способами: за згладженою кривою графіка ймовірності безвідмовної роботи та для випадку постійної інтенсивності відмов за точною і наближеною формулами 3.7 та 3.8, відповідно.

7. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Назвіть та охарактеризуйте показники надійності виробів при відмовах з постійною інтенсивністю.
2. Що являє собою крива зміни інтенсивності відмов в часі?
3. Дайте означення інтенсивності відмов.
4. Дайте означення гамма-відсоткового напрацювання до відмови.
5. Чим обумовлені високі значення інтенсивності відмов приладів мікро- та наноелектроніки в період зносу?
6. Як визначаються $P(t)$, $Q(t)$ та $f(t)$ при експоненціальному законі розподілу за умови, що інтенсивність відмов постійна?
7. Як визначається гамма-90% напрацювання за точною і наближеною формулами для випадку постійної інтенсивності відмов?

7.4 Лабораторна робота № 4

Планування випробувань на надійність

Мета роботи: набуття навичок роботи під час дослідження ефективності планів контрольних випробувань на надійність.

Порядок виконання роботи

1. З таблиці 7.10 відповідно до варіанта вибрати значення коефіцієнта випробування K_D , кількість випробовуваних виробів n , гарантовану та середню інтенсивності відмов λ_T та λ_C . Для виконання п. 2 та 3 завдання необхідно вибрати значення λ_T , записане другим у стовпці.

Таблиця 7.10 – Варіанти вхідних даних

	№ варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_C \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$	3,4	2,7	3,1	2,5	2,8	3,3	3,5	2,8	3,1	2,2
K_D	14	18	15	15	14	16	16	18	17	17
n , шт.	210	180	170	200	180	220	150	170	180	190
$\lambda_T \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$	4,2	4,2	4,5	3,7	4,1	4,5	5,0	4,2	4,6	3,5
	5,8	5,7	5,9	4,9	5,4	5,7	6,5	7,8	6,1	4,8
	7,4	7,2	7,3	6,1	6,7	6,9	8,9,5	9,2	7,6	6,1
	9,0	8,7	8,7	7,3	9,3	8,1	11	10,6	9,1	7,4
	10,6	10,2	10,1	8,5	10,6	9,3	12,5	12	10,6	8,7
	12,2	11,7	11,5	9,7	11,9	10,5	14	13,4	12,1	10,0
	13,8	13,2	12,9	10,9	13,2	11,7	15,5	14,8	13,6	11,3
	15,4	14,7	14,3	12,1		12,9			15,1	12,6

2. Дослідити залежність часу випробувань на безвідмовність від допустимої кількості відмов для одноступеневого методу, для чого:

- обчислити час та достовірність випробувань за умови недопустимості відмов за виразами 5.5 та 5.6, відповідно;
- обчислити час та достовірність випробувань для одноступеневого методу за умови допустимості однієї відмови за виразами 5.8 та 5.9, відповідно.

3. Дослідити залежність часу випробувань на безвідмовність від допустимої кількості відмов для двоступеневого методу, для чого:

- обчислити час та достовірність випробувань за умови недопустимості відмов за виразами 5.14 та 5.15, відповідно;
- обчислити час та достовірність випробувань за умови допустимості однієї відмови за виразами 5.17 та 5.18, відповідно.

Не дивлячись на те, що повторні випробування при застосуванні двоступеневого методу будуть виконуватись не завжди, за час випробувань при застосуванні цього методу необхідно брати суму часу першого та повторного випробувань.

Оскільки варіантів планів випробувань небагато, то результати розрахунків досить записати у вигляді таблиці значень часу та достовірності випробувань для недопустимості відмов при одноступених випробуваннях, при одній допустимій відмові, при двох допустимих відмовах та при двоступених випробуваннях при недопустимості відмов у повторних випробуваннях та при допустимості однієї відмови (зразок таблиці 7.11).

4. Дослідити залежність достовірності випробувань для планів п. 2 та п. 3 залежно від вибору граничного значення інтенсивності відмов. Дослі-

дження достовірності випробувань доцільно проводити шляхом побудови залежності в табличній формі, а за даними таблиць будувати графічне зображення всіх кривих на одному графіку.

Зразок таблиці

Таблиця 7.11 – Варіанти вхідних даних

Час та достовірність випробувань	План випробувань					
	Одноступеневий			Двоступеневий		
	Безвідмовний	Допускається одна відмова	Допускаються дві відмови	Безвідмовний	Повторний безвідмовний	Повторний з однією відмовою
t_B , год						
P_n						

5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Класифікація випробувань на надійність мікроелектронних виробів.
2. Як визначається коефіцієнт прискорення?
3. Для чого призначені форсовані випробування? Що використовується як прискорювальні фактори?
4. Особливості проведення випробувань на безвідмовність.
5. Визначення обсягу випробувань при заданому часі випробувань.
6. Достовірність одноступеневих випробувань і її залежність від кількості допустимих відмов.
7. Принцип двоступеневих випробувань.
8. Визначення параметрів плану двоступеневих випробувань.

7.5 Лабораторна робота № 5

Підвищення надійності мікроелектронних приладів шляхом вилучення потенційно ненадійних виробів

Мета роботи: набуття навичок роботи із дослідження ефективності підвищення надійності транзисторів шляхом вилучення екземплярів з підвищеним рівнем низькочастотних шумів.

Порядок виконання роботи

1. З таблиці 7.12 відповідно до варіанта вибрати значення часу напрацювання та рівня шумів транзисторів трьох груп А, Б, В.

Таблиця 7.12 – Витяг з протоколів випробувань транзисторів

№ випроб.	Група	Вар.01		Вар.02		Вар.03		Вар.04		Вар.05	
		$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год
1	А	0,22	0,62	0,12	0,68	0,42	0,62	0,42	0,62	0,17	0,62
2	Б	0,63	0,62	0,58	0,58	0,18	0,71	0,18	0,71	0,16	0,62
3	В	0,17	0,80	0,55	0,63	0,42	0,58	0,42	0,58	0,65	0,80
4	А	0,14	0,83	0,24	0,45	0,38	0,59	0,38	0,59	0,10	0,83
5	Б	0,13	0,73	0,13	0,94	0,15	0,81	0,15	0,81	0,13	0,73
6	В	0,08	0,80	0,17	0,91	0,16	0,67	0,16	0,67	0,20	0,80
7	А	0,58	0,57	0,45	0,59	0,12	0,63	0,12	0,63	0,07	0,57
8	Б	0,38	0,49	0,34	0,64	0,50	0,47	0,50	0,47	0,10	0,49
9	В	0,12	0,88	0,28	0,71	0,25	0,61	0,25	0,61	0,42	0,88
10	А	0,31	0,53	0,18	0,19	0,18	0,42	0,18	0,42	0,08	0,53
11	Б	0,09	0,78	0,36	0,68	0,65	0,62	0,65	0,62	0,52	0,78
12	В	0,15	0,85	0,62	0,61	0,23	0,43	0,23	0,43	0,32	0,61
13	А	0,28	0,58	0,35	0,66	0,33	0,55	0,33	0,55	0,58	0,82
14	Б	0,35	0,50	0,27	0,61	0,21	0,61	0,45	0,66	0,15	0,81
15	В	0,10	0,79	0,38	0,65	0,39	0,76	0,21	0,69	0,17	0,70
16	А	0,31	0,61	0,41	0,46	0,44	0,53	0,41	0,56	0,66	0,77
17	Б	0,43	0,62	0,39	0,92	0,17	0,57	0,39	0,62	0,12	0,55
18	В	0,15	0,83	0,54	0,89	0,14	0,83	0,18	0,79	0,12	0,45
19	А	0,48	0,53			0,14	0,65	0,14	0,64	0,19	0,85
20	Б	0,28	0,47	0,25	0,53			0,13	0,65		
21	В			0,61	0,68	0,28	0,52			0,43	0,79
№ випроб.	Група	Вар.06		Вар.07		Вар.08		Вар.09		Вар.10	
		$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год	$U_{Ш}$ мВ	t_H тис. год
1	А	0,17	0,81	0,12	0,68	0,32	0,63	0,20	0,64	0,12	0,62
2	Б	0,16	0,68	0,58	0,58	0,08	0,70	0,65	0,62	0,58	0,71
3	В	0,65	0,65	0,55	0,63	0,42	0,58	0,17	0,80	0,55	0,58
4	А	0,10	0,68	0,24	0,45	0,48	0,59	0,13	0,83	0,24	0,59
5	Б	0,13	0,43	0,13	0,94	0,17	0,80	0,13	0,73	0,13	0,81
6	В	0,20	0,65	0,17	0,91	0,16	0,67	0,08	0,80	0,17	0,67
7	А	0,07	0,89	0,45	0,59	0,13	0,83	0,58	0,57	0,45	0,63
8	Б	0,10	0,99	0,34	0,64	0,52	0,57	0,48	0,59	0,34	0,47
9	В	0,42	0,59	0,28	0,71	0,20	0,64	0,10	0,98	0,28	0,61
10	А	0,08	0,71	0,18	0,19	0,13	0,42	0,31	0,63	0,18	0,42
11	Б	0,52	0,55	0,36	0,68	0,65	0,64	0,07	0,88	0,36	0,62
12	В	0,32	0,62	0,62	0,61	0,13	0,73	0,15	0,78	0,62	0,43
13	А	0,58	0,58	0,13	0,67	0,36	0,57	0,14	0,81	0,35	0,55
14	Б	0,15	0,67	0,55	0,55	0,11	0,68	0,14	0,79	0,27	0,66
15	В	0,62	0,63	0,56	0,61	0,39	0,55	0,09	0,85	0,38	0,69
16	А	0,12	0,71	0,23	0,47	0,45	0,57	0,51	0,55	0,41	0,56
17	Б	0,15	0,45	0,17	0,90	0,19	0,82	0,45	0,52	0,39	0,62
18	В	0,24	0,61	0,15	0,89	0,18	0,69	0,12	0,96	0,54	0,79
19	А			0,49	0,57	0,15	0,80	0,27	0,61		
20	Б	0,13	0,95	0,38	0,66					0,25	0,65
21	В	0,45	0,55			0,12	0,58			0,61	0,64

3. Для запропонованого варіанта умов випробувань визначити параметр надійності у вигляді оцінки: інтенсивності відмов транзистора після запровадження вилучення транзисторів з підвищеним рівнем низькочастотних шумів, для чого

- обчислити середню інтенсивність відмов впродовж гарантованого строку служби за формулами 4.4 та 4.5;
- значення параметрів для кожної з груп
 Група А: $\lambda_{CI} = 5,8 \cdot 10^{-7}$; $t_T = 50$ тис. год; $N = 1100$ шт.
 Група Б: $\lambda_{CI} = 7,2 \cdot 10^{-7}$; $t_T = 40$ тис. год; $N = 900$ шт.
 Група В: $\lambda_{CI} = 2,6 \cdot 10^{-7}$; $t_T = 60$ тис. год; $N = 1000$ шт.

4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Природа низькочастотних шумів мікроелектронних приладів.
2. Принцип відбракування потенційно ненадійних виробів за шумами.
3. Визначення границі бракування для вилучення потенційно ненадійних виробів за шумами.
4. Встановлення ефективності підвищення надійності за рахунок вилучення виробів з підвищеним рівнем шумів.

7.6 Лабораторна робота № 6

Підвищення надійності мікроелектронних приладів шляхом застосування технологічного тренування

Мета роботи: набуття навичок роботи із дослідження режимів та ефективності технологічного тренування ІМС для підвищення їх надійності.

Порядок виконання роботи

1. З таблиці 7.14 вибрати відповідно до варіанта кількість виробів, що відмовили n , загальну кількість випробовуваних виробів N та час напрацювання до відмови при різних значення температури тренування t_i .

Таблиця 7.14 – Час напрацювання τ (годин) до відмови n виробів

Варіанти		Температура тренування t_i , °C							
		125	150	175	200	225	250	275	300
1	τ_i , год	450	181	79	42	19	6,5	2,8	0,4
$n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.									

Продовження таблиці 7.14

Варіанти		Температура тренування t , °C							
		125	150	175	200	225	250	275	300
2 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	400	169	61	32	16	6,2	1,9	0,4
3 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	500	148	64	25	5,9	3,1	1,2	0,2
4 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	400	175	53	33	16	4,1	2,9	1,3
5 $n = 16$ шт. $N = 900$ шт.	τ_i , год	300	175	56	29	12	3,2	1,4	0,3
6 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	450	131	63	18	9,1	3,3	1,1	0,2
7 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	500	145	41	17	5,2	2,7	0,9	0,3
8 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	500	130	42	14	5,4	1,9	0,8	0,2
9 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	400	152	58	34	17	6,1	1,9	0,2
10 $n = 15$ шт. $N = 1000$ шт.	τ_i , год	400	172	49	32	12	3,1	1,9	0,3

2. За результатами досліджень впливу підвищеної температури тренування на інтенсивність відмов визначити оптимальну температуру тренування, для чого:

- обчислити інтенсивності відмов λ_i для усіх значень часу тренування τ_i , використовуючи формулу 4.23;
- результати випробувань відкладаються на графіку з напівлогарифмічним масштабом: на вертикальній осі відкладаються поділки значень температури в лінійному масштабі, а на горизонтальній – поділки значень інтенсивності відмов в логарифмічному масштабі;
- з графіка визначити оптимальну температуру тренування: при побудові графіка залежності між температурою і інтенсивністю відмов необхідно мати на увазі, що кількість відмов невелика і точність залежності також буде невисокою, тому середню лінію необхідно проводити за всіма правилами усереднення з метою більш точного визначення температури, при якій вже порушу-

ється закон Ареніуса, тобто порушується лінійність графіка; температура тренування вибирається дещо нижчою за цю температуру.

3. За результатами досліджень впливу підвищеної температури тренування на інтенсивність відмов визначити коефіцієнт прискорення і час тренування:

- коефіцієнт прискорення $K_{ПР}$ визначається за графіком як відношення інтенсивності відмов при температурі тренування до інтенсивності відмов при температурі 125 °С;
- час тренування визначається за виразом:

$$\tau_{ТР} = \frac{\tau_i}{K_{ПР}}$$

4. Визначити середню інтенсивність відмов після запровадження технологічного тренування за формулою 4.24. Для розрахунку значення інтенсивності відмов до запровадження операції та гарантованого терміну служби прийняти $\lambda_{С1} = 5,6 \cdot 10^{-7}$, $\tau_T = 50$ тис. год, відповідно.

5. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що являє собою крива зміни інтенсивності відмов в часі?
2. Чим обумовлені високі значення інтенсивності відмов приладів мікро- та наноелектроніки в період початкового напрацювання?
3. Охарактеризуйте напрямки збільшення надійності ІМС.
4. Дайте означення операції «технологічне тренування».
5. Розкажіть коротко про види технологічного тренування.
6. Що являє собою операція «термотренування»?
7. Як визначається час тренування при застосуванні прискорювального фактора?
8. Визначення ефективності технологічного тренування.

СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ

<i>Безвідмовність</i>	faultlessness	безотказность
<i>Відмова</i>	refuse	отказ
<i>Відновлювані технічні засоби</i>	refurbishable hardware	возобновляемые технические средства
<i>Довговічність</i>	longevity	долговечность
<i>Збережність</i>	safety	сохраняемость
<i>Експоненціальний розподіл</i>	exponential distribution	экспоненциальное распределение
<i>Інтенсивність відмов</i>	intensity of refuses	интенсивность отказов
<i>Ймовірність</i>	probability	вероятность
<i>Ймовірність безвідмовної роботи</i>	probability of faultless work	вероятность безотказной работы
<i>Ймовірність відмови</i>	probability of refuse	вероятность отказа
<i>Контрольні випробування</i>	proof-testing	контрольные испытания
<i>Надійність</i>	reability	надежность
<i>Напрацювання</i>	work	наработка
<i>Напрацювання до відмови</i>	work is to the refuse	наработка на отказ
<i>Невідновлювані технічні засоби</i>	unrefurbishable hardware	невозобновляемые технические средства
<i>Нормальний розподіл</i>	normal distribution	нормальное распределение
<i>Показник надійності</i>	reability index	показатель надежности
<i>Резервування</i>	backuping	резервирование
<i>Ремонтнопридатність</i>	maintainability	ремонтпригодность
<i>Ресурс</i>	resource	ресурс
<i>Роботоздатність</i>	capacity	работоспособность
<i>Розподіл Вейбулла</i>	Weibull distribution	распределение Вейбулла
<i>Середнє напрацювання</i>	middle work	средняя наработка
<i>Середній час відновлення</i>	mean time of renewal	среднее время восстановления
<i>Строк служби</i>	term of exploitation	срок эксплуатации
<i>Частота відмов</i>	frequency of refuses	частота отказов

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бардило А. П. Основи теорії надійності / А. П. Бардило, Г. Г. Триш. – Львів : ЛПІ, 1991. – 100 с.
2. Боровиков С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств : учебное пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
3. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 129 с.
4. Дубіненко С. Б. Основи теорії надійності систем управління і автоматики : навчальний посібник / С. Б. Дубіненко, С. Д. Штовба. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 65 с.
5. Калінін В. І. Збірник задач та вправ з надійності електронної апаратури : навчальний посібник / В. І. Калінін, О. А. Костюк, А. А. Грудін. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 103 с.
6. Калінін В. І. Математичні моделі та методи оцінки експлуатаційної надійності елементів та виробів електронної техніки : навчальний посібник / В. І. Калінін, О. А. Костюк, А. А. Грудін. – Вінниця : ВДТУ, 1999. – 56 с.
7. Капіцький Я. І. Конструювання, проектування, надійність засобів автоматики і вимірювальної техніки в прикладах і задачах : навчальний посібник / Я. І. Капіцький, В. О. Поджаренко, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 197 с.
8. Кичак В. М. Надійність і контроль якості виробів електронної техніки : навчальний посібник / В. М. Кичак, І. В. Федун. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 122 с.
9. Марин В. П. Надежность и испытания изделий радиоэлектроники : учебное пособие / В. П. Марин, С. Я. Гродзенский. – Москва : МИРЭА, 2009. – 136 с.
10. Никулин С. М. Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры / Никулин С. М. – М. : ЭНЕРГИЯ, 1979. – 80 с.
11. Половко А. М. Основы теории надежности. Практикум / А. М. Половко, С. М. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
12. Саранча Г. А. Метрологія, стандартизація, відповідність, акредитація та управління якістю : підручник / Саранча Г. А. – К. : Центр навч. літератури, 2006. – 672 с.
13. Топольник В. Г. Метрологія, стандартизація, сертифікація і управління якістю : навчальний посібник / В. Г. Топольник, М. А. Котляр. – Львів : Магнолія-2006, 2009. – 212 с.
14. Цюцюра С. В. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація : навчальний посібник / С. В. Цюцюра, В. Д. Цюцюра. – К. : Знання, 2006. – 242 с.

Навчальне видання

**Крилик Людмила Вікторівна
Селецька Олена Олександрівна**

НАДІЙНІСТЬ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ ПРИЛАДІВ МІКРО- І НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено О. Селецькою

Підписано до друку 14.04.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,6.
Наклад 75 пр. Зам. № 2016-049.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.