МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

П. Ф. Щапов, Т. В. Чуніхіна, О. В. Чмихова

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Навчально-методичний посібник
для студентів спеціальностей 171 «Електроніка»,
175 «Інформаційно-вимірювальні технології»,
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 27.06.2024 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2024

УДК 519.248
Щ 25

Рецензенти:

С. Ю. Плєснецов, д-р техн. наук,
Національний технічний університет «ХПІ»;
І. П. Захаров, д-р техн. наук,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Щапов П. Ф.

Щ 25 Математичні методи розрахунку надійності електронних засобів : навч.-метод. посібник для студентів спеціальностей 171 «Електроніка», 175 «Інформаційно - вимірювальні технології» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / П. Ф. Щапов, Т. В. Чуніхіна, О. В. Чмихова. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – 110 с.

ISBN 978-617-05-0523-1

Розглянуто основні питання з теорії похибок вимірювань та теорії ймовірностей, базові ймовірнісні моделі показників безвідмовності засобів вимірювальної техніки, поданий довідково-інформаційній матеріал для їх розрахунку.

Призначено для студентів спеціальностей 171 «Електроніка», 175 «Інформаційно - вимірювальні технології» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Іл. 14. Табл. 94. Бібліогр. 9 назв.

УДК 519.248

ISBN 978-617-05-0523-1

© Щапов П. Ф., Чуніхіна Т. В.,
Чмихова О. В., 2024
© НТУ «ХПІ», 2024

ВСТУП

Зростання складності радіоелектронної апаратури призвело до зниження її надійності, що стимулювало, в свою чергу, розвиток відповідного наукового напрямку – теорії надійності.

Всі вироби радіоелектронної промисловості характеризуються якістю, тобто певною сукупністю властивостей, які істотно відрізняють даний виріб від інших і визначають ступінь його придатності для використання за своїм призначенням. В процесі експлуатації внаслідок зносу і незворотних процесів старіння характеристики радіоелектронних засобів (а, отже, і їх якість) змінюються. Це стосується, зокрема, і метрологічних характеристик радіоелектронних засобів. Зміна якості виробу в часі характеризує один з головних його показників – надійність.

Метрологічна надійність, яка полягає у збереженні нормованих метрологічних характеристик в установлених границях за певних умов експлуатації протягом заданого часу, є складовою надійності електронних засобів.

Отже, у перших двох розділах посібника будуть розглянуті основні питання теорії похибок вимірювань та надані загальні відомості із теорії ймовірностей та математичної статистики.

Проблема забезпечення надійності технічних засобів в її сучасному вигляді була сформульована на початку 50-х років стосовно радіоелектронних пристроїв, побудованих з великого числа елементів. В даний час методи аналізу та контролю надійності широко використовуються в багатьох галузях промисловості. Забезпечення надійності продукції, що випускається, стало однією з найважливіших загальнодержавних завдань.

Ненадійність завдає великих економічних збитків, пов’язаних з витратами на запасні частини, ремонтне обладнання та утримання технічного персоналу, не кажучи вже про загрозу безпеці та здоров’ю людей. Практичний досвід показує, що часто вигідніше витратити додаткові кошти на забезпечення надійності на етапі розробки, ніж розплачуватися за гадану економію коштів при проектуванні з ненадійністю системи при її експлуатації.

Навчально-методичний посібник присвячено математичним основам теорії надійності інформаційних систем. Він повинен допомогти студентам в оволодінні математичними методами теорії надійності систем, які необхідні інженеру в його практичній роботі. Підкреслюється роль математичних моделей відмов та відновлень, імовірнісно-статистичних методів аналізу структури системи на етапі проектування і обробки даних по надійності інформаційної системи і її елементів, отриманих при випробуванні або в процесі експлуатації. Розглядаються питання резервування складних систем.

Посібник призначений для студентів електронних, метрологічних, електротехнічних, радіотехнічних спеціальностей при вивченні переддипломних курсів і при виконанні дипломних проєктів та робіт.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ІЗ ТЕОРІЇ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Сьогодні вимірюванням підлягають сотні фізичних величин, і на основі вимірювальної інформації приймаються певні рішення, дуже часто, надзвичайної важливості. Необхідним є забезпечення достовірності вимірювальної інформації. Достовірність вимірювальної інформації базується на точності вимірювань – одному із показників якості вимірювань. Якість вимірювань значною мірою залежить від засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які є одним із найважливіших компонентів вимірювального процесу. У свою чергу, для оцінки якості ЗВТ використовується широка номенклатура показників, серед яких одними із основних є метрологічні характеристики.

Метрологічні характеристики ЗВТ – це характеристики ЗВТ, які визначають:

- результат вимірювання;
- інструментальну похибку вимірювань.

Метрологічна надійність засобу вимірювальної техніки – це надійність засобу вимірювальної техніки у частині збереження його метрологічної справності (стан такого засобу, що визначає відповідність його метрологічних характеристик встановленим вимогам).

1.1 Похибки вимірювань

Оцінювання похибок вимірювання є обов'язковим етапом:

а) під час проведення будь-яких вимірювань;

б) при проектуванні та виробництві абсолютно усіх ЗВТ, оскільки похибки є найважливішою метрологічною характеристикою ЗВТ.

1.1.1 Умови проведення вимірювань або експлуатації електронних засобів

Будь-які вимірювання виконуються у певних умовах. Ці умови чинять вплив на ЗВТ і призводять до змін його параметрів, а, відповідно, до змін нормованих метрологічних характеристик (питання нормування метрологічних характеристик ЗВТ розглядається у підрозділі 1.4.1).

Умови вимірювань розділяють на 4 основні групи:

1. Кліматичні умови:

-температура

-вологість

-атмосферний тиск та ін.

2. Механічні умови:

-тряски

-вібрації

-удари

3. Вплив силових полей:

-електричних

-магнітних

-гравітаційного

4. Інші умови (наприклад, склад повітря оточуючого середовища).

Іноді групи умов 1-4 об'єднують і називають умовами або параметрами оточуючого середовища. Умови вимірювань обов'язково нормуються для конкретного виду ЗВТ. Вони залежать від кліматичної зони, в якій проводять вимірювання.

Умови вимірювань відносять разом з неінформативними параметрами вимірювальних сигналів до впливних величин.

Впливні величини – це величини, які безпосередньо не вимірюються, але чинять вплив на результат і похибку вимірювань.

Неінформативними параметрами вимірювальних сигналів називають параметр, який не містить інформації про вимірювану величину, але чинить вплив на результат і похибку вимірювань (приклад: при вимірюванні фазового зсуву між двома синусоїдальними сигналами цифровим фазометром неінформативними параметрами є амплітуда та коефіцієнт гармонік).

За ступеням впливу на похибку ЗВТ розрізняють 3 області умов вимірювання (умов застосування засобів вимірювальної техніки):

1. *Нормальні умови*
2. *Робочі умови*
3. *Граничні умови*

Нормальні умови – це умови застосування ЗВТ, за яких впливні величини мають нормальні (номінальні) значення або знаходяться в границях нормального інтервалу значень. За нормальних умов

здійснюються градуювання і повірка ЗВТ. Нормальні умови задаються нормативно-технічними документами.

Для більшості ЗВТ установлені такі номінальні умови (для деяких впливних величин):

- температура навколишнього повітря – $(20 \pm 5)^0$C або (293±5)K;

- відносна вологість повітря – (65 ± 15) %;

- атмосферний тиск – $(101{,}3 \pm 4)$ кПа або (760 ± 30) мм рт. ст.;

- частота вібрації – 1...60 Гц;

- середнє квадратичне значення напруги живлення – (220±4,4) В і $(115 \pm 2{,}5)\,B$;

- частота напруги живлення – (50 ± 1) Гц та (400 ± 12) Гц.

Робочі умови – це умови застосування ЗВТ, за яких значення впливних величин знаходяться в границях робочого інтервалу значень, що є більш широким, ніж нормальний інтервал значень (це реальні умови застосування засобів вимірювальної техніки).

Граничні умови визначають значення впливних величин, за яких відбувається транспортування і зберігання ЗВТ без зміни їх метрологічних характеристик після повернення цього засобу в робочі умови. Граничні умови перевищують робочі умови.

1.1.2. Класифікація похибок вимірювань

Похибки вимірювань класифікують наступним чином [1]:

- за джерелом виникнення (методична, інструментальна, суб'єктивна);

- за закономірністю або характером змінювання за часом (систематичні та випадкові);

- за формою або способом відображення кількісних характеристик похибки вимірювань (абсолютна та відносна).

Методичні похибки обумовлені недосконалістю метода вимірювань.

Інструментальні похибки – це похибки вимірювань, які пов'язані із недосконалістю засобу вимірювальної техніки.

Відокремлюють два види інструментальних похибок:

-похибка ЗВТ у реальних умовах експлуатації;

-похибка взаємодії (обумовлена взаємодією ЗВТ з об'єктом вимірювання, тобто залежить не тільки від властивостей ЗВТ, а і від властивостей об'єкта вимірювань). Приклади похибки взаємодії:

вимірювання електричного струму та напруги в електричному колі за допомогою амперметра та вольтметра, відповідно.

Суб'єктивні похибки – це похибки, які зумовлені психо-фізіологічними особливостями людини-оператора. Вони виникають тільки при проведенні вимірювань за допомогою аналогових вимірювальних приладів.

Існує два види суб'єктивних похибок:

- похибка відліку (або заокруглення);

- похибка паралаксу (для усунення похибки паралаксу зчитування показів приладу необхідно робити таким чином, щоб кут зору був перпендикулярний шкалі у точці відліку).

Систематична похибка – це складова похибки вимірювання, яка при повторних вимірюваннях того самого розміру фізичної величини залишається постійною або змінюється за певним законом.

Випадкова похибка – це складова похибки вимірювання, що змінюється випадково (непередбачено за значенням і знаком) при повторних вимірюваннях того самого розміру фізичної величини, проведених з однаковою старанністю.

Позначення систематичної та випадкової похибок:

Δ_S – систематична похибка;

$\overset{o}{\Delta}$ – випадкова похибка.

Абсолютна похибка вимірювань – це різниця між результатом вимірювання та істинним значенням вимірюваної фізичної величини.

Відносна похибка вимірювань – це відношення абсолютної похибки вимірювань до істинного значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка розраховується за наступною формулою:

$$\Delta X = X - X_i,$$

де X – результат вимірювання (показ приладу);

X_i – істинне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка може включати обидві складові: випадкову та систематичну.

Сума систематичної та випадкової похибок вимірювання складає, так звану, повну або сумарну похибку вимірювань.

Повна похибка позначається символом Δ і розраховується як [2].

$$\Delta = \Delta_S + \overset{o}{\Delta}.$$

Систематична складова похибки вимірювань являє собою математичне сподівання повної похибки

$$\Delta_S = M[\Delta].$$

Зазвичай, намагаються виявити та вилучити систематичну складову похибки вимірювань, тоді $\Delta = \overset{o}{\Delta}$.

Для вилучення систематичної похибки вимірювання використовується метод, який полягає у введенні поправки у результат вимірювання.

Поправка – це абсолютна похибка, взята із протилежним знаком

$$П = -\Delta X = X_i - X \ .$$

Випадкова похибка вимірювання обумовлена, в основному, дією на ЗВТ великої кількості внутрішніх та зовнішніх факторів, які змінюються випадково. Через це випадкова похибка вимірювання повністю вилучена із результату вимірювання бути не може, але її можна зменшити проведенням вимірювань з багаторазовими спостереженнями та подальшою статистичною обробкою результатів вимірювань.

Абсолютна похибка використовується для запису результату вимірювання.

Відносна похибка вимірювань – це відношення абсолютної похибки вимірювань до істинного значення вимірюваної величини.

Відносна похибка вимірювання визначається за формулою:

$$\delta = \pm \frac{\Delta X}{X_i} \cdot 100\% \approx \pm \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% \ ,$$

де ΔX – абсолютна похибка вимірювання;

X_i – істинне значення вимірюваної величини;

X – результат вимірювання (показ приладу).

Відносна похибка характеризує точність вимірювань та використовується для співставлення результатів вимірювань (навіть різнорідних фізичних величин) за точністю (measurement accuracy, accuracy of measurement, accuracy) [2].

Точність вимірювань є одним із чотирьох показників якості вимірювань. Окрім точності виділяють: правильність, збіжність та відтворюваність результатів вимірювань.

Точність результатів вимірювань – це показник якості вимірювань, який визначається близкістю результатів вимірювань до істинного значення. Характеризується повною абсолютною похибкою, тобто близькістю до нуля повної похибки (Δ).

Правильність результатів вимірювань – це показник якості вимірювань, який характеризується близькістю до нуля систематичної складової похибки вимірювань (Δ_S).

Збіжність результатів вимірювань – це показник якості вимірювань того самого розміру фізичної величини, які виконуються повторно тими самими методом вимірювань і засобами вимірювальної техніки, тим же оператором, в один і той же час та в однакових умовах.

Відтворюваність результатів вимірювань – це показник якості вимірювань того самого розміру фізичної величини різними методами вимірювань і засобами вимірювальної техніки, різними операторами у різних місцях і в різний час виконання експерименту, але приводять до однакових умов виконання вимірювань (температури, вологості, тиску, та інших впливних величин).

Збіжність та *відтворюваність вимірювань* оцінюються за допомогою середнього квадратичного відхилення результатів вимірювань.

Показники якості вимірювань збіжність та відтворюваність широко використовуються не тільки при вимірюванні електричних та магнітних величин, але й величин з інших областей вимірювань, наприклад, вологості насіння соняшника під час проведення хімічних досліджень [3].

1.2. Похибки засобів вимірювальної техніки

Похибки засобів вимірювальної техніки розділяють за наступними класифікаційними ознаками [1]:

- за формою або способом відображення кількісних характеристик похибки вимірювань (абсолютна, відносна, зведена, варіація показів ЗВТ та гранична похибка).
- за характером зміни похибки у часі (систематичні та випадкові).
- залежність похибки від зміни вимірюваної величини в часі (статичні і динамічні);
- залежність похибки від зовнішніх умов експлуатації ЗВТ(основні і додаткові);

- залежність похибки від вимірюваної величини (адитивні й мультиплікативні);

- залежність похибки від взаємодії ЗВТ з об'єктом вимірювання та іншими ЗВТ, що входять до складу вимірювальної схеми (похибка взаємодії).

Абсолютна похибка засобу вимірювань – це різниця між показом ЗВ (значенням сигналу вимірювальної інформації) X та істинним значенням X_i вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання:

$$\Delta X = X - X_i, \tag{1.1}$$

де X – результат вимірювання (показ приладу);

X_i – істинне значення вимірюваної величини.

Відносна похибка ЗВТ – це відношення абсолютної похибки ЗВТ до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \pm \frac{\Delta X}{X_i} \cdot 100\% \approx \pm \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%, \tag{1.2}$$

де ΔX – абсолютна похибка ЗВТ;

X_i – істинне значення вимірюваної величини;

X – результат вимірювання (показ приладу).

Зведена похибка засобу вимірювань являє собою відношення абсолютної похибки ЗВ до нормованого значення X_N вимірюваної величини і виражається у відсотках:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\%, \tag{1.3}$$

де ΔX – абсолютна похибка ЗВТ;

X_N – нормуюче значення ЗВТ.

Особливість завдання нормуючого значення X_N для приладів, у яких переважає адитивна похибка: якщо для засобу вимірювань задане деяке номінальне значення вимірюваної величини X_H, то $X_N = X_H$, наприклад, для частотомірів з діапазоном (45...55) Гц і номінальною частотою 50Гц $X_N = 50$ Гц.

Границя допустимої похибки ЗВТ – це найбільше за модулем значення похибки ЗВТ, за яким цей засіб ще може бути визнаний придатним до застосування.

Варіація показу засобу вимірювань – це різниця між двома показами засобу, що одержують для того самого значення вимірюваної величини (на вході ЗВ), якого досягають спочатку при плавному збільшенні, а потім при плавному зменшенні вимірюваної величини.

Статичні похибки виникають при статичному режимі експлуатації ЗВТ. Вони обумовлені тільки властивостями засобів вимірювальної техніки і не залежать від параметрів вхідних сигналів ЗВТ, тому їх нормують.

Динамічні похибки з'являються у динамічному режимі експлуатації ЗВТ. Вони залежать як від параметрів ЗВТ, так і від характеристик вхідних сигналів. Динамічні похибки не нормують.

Основна похибка ЗВТ – похибка ЗВТ за нормальних умов експлуатації.

Основна похибка встановлюється класом точності ЗВТ. Основні похибки є статичними.

Додаткові похибки ЗВТ – це похибки ЗВТ, які виникають у робочих умовах експлуатації ЗВТ.

Кількість додаткових похибок дорівнює кількості впливних величин, які вийшли за допустимі границі, що відповідають нормальним умовам експлуатації ЗВТ.

Адитивна похибка – це абсолютна похибка, яка не залежить від вимірюваної величини

Мультиплікативна похибка – це абсолютна похибка, яка залежить від вимірюваної величини.

Розглянемо похибку взаємодії, яка виникає при вимірюванні струму в електричному колі за допомогою амперметру.

Похибка взаємодії у цьому разі обчислюється за формулою:

$$\delta_{вз} = -\frac{1}{1+\frac{r_к}{r_A}} \cdot 100\%, \qquad (1.4)$$

де $r_к$ – опір електричного кола;

r_A – внутрішній опір амперметру.

Отримаємо цей вираз, використовуючи теоретичний матеріал, поданий нижче у цьому підрозділі.

Дійсне значення струму I_0, який протікає в електричному колі, розраховується як

$$I_0 = \frac{U}{r_к}$$

Реальне значення струму I, яке вимірюється амперметром дорівнює

$$I = \frac{U}{r_A + r_к}$$

Використовуючи загальний вираз для обчислення відносної похибки вимірювання, запишемо формулу для розрахунку відносної похибки взаємодії

$$\delta_{вз} = \frac{\Delta I}{I_0} \cdot 100\% = \frac{I - I_0}{I_0} \cdot 100\%,$$

де ΔI – абсолютна похибка вимірювання струму;

I_0 – істинне значення струму, який протікає через електричне коло;

I – реальне (виміряне) значення струму, який протікає через електричне коло, в яке увімкнено амперметр.

$$\delta_{вз} = \frac{\frac{U}{r_к + r_A} - \frac{U}{r_к}}{\frac{U}{r_к}} \cdot 100\% = \frac{U \cdot r_к - U(r_к + r_A)}{r_к \cdot (r_к + r_A)} \cdot \frac{r_ц}{U} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{U(r_к - r_к - r_A)}{r_к \cdot (r_к + r_A)} \cdot \frac{r_к}{U} \cdot 100\% = -\frac{r_A \cdot r_к}{r_к(r_к + r_A)} = -\frac{r_A}{r_к + r_A} \cdot 100\% =$$

$$= -\frac{1}{1 + \frac{r_к}{r_A}} \cdot 100\% = -\frac{1}{1 + \frac{P_к}{P_A}} \cdot 100\%$$

Таким чином, можна зробити висновок, що для того, щоб похибка взаємодії при підключенні до електричного кола амперметра була як можна меншою, внутрішній опір амперметра повинен бути як можна меншим.

1.3. Подання результатів вимірювань

Результат вимірювання записується наступним чином:

$$X_0 = (X \pm \Delta X) \text{ } \textit{із зазначенням розмірності ФВ},$$

де X – результат вимірювання (показ приладу або розраховане середнє арифметичне значення при проведенні вимірювань із багаторазовими спостереженнями);

ΔX – абсолютна похибка вимірювання.

Спочатку треба провести округлення абсолютної похибки за наступним правилом: якщо перша значуща цифра цифрового значення абсолютної похибки дорівнює 1 або 2, то треба залишити дві значущі цифри, якщо більше (3, 4, 5…) – тоді одну.

Значуща цифра будь-якого числа це:

а) цифра від 1 до 9;

б) це може бути і нуль, якщо він розташований між двох цифр за типом а.

Решта нулів, які використовуються для позначення розрядності числа, до значущих цифр не відносяться.

Далі треба представити результат вимірювання X таким чином, щоб він закінчувався цифрою тієї ж розрядності, що і абсолютна похибка.

Приклади подання результатів вимірювань.

Отримано три результати вимірювань струму, напруги та частоти з відповідними значеннями абсолютних похибок:

$I = 1,6234, \Delta I = \pm 0,0237\text{A}$

$U = 324,7651\text{V}, \Delta U = \pm 0,413\text{V}$

$f = 51,382\ \text{Hz}, \Delta f = \pm 0,0613\text{Hz}$

Необхідно записати результати вимірювань.

Розв'язання:

$I_0 = (1,623 \pm 0,024)\,\text{A}$

$U_0 = (324,8 \pm 0,4)\,\text{V}$

$f_0 = (51,38 \pm 0,06)\,\text{Hz}$

В теорії невизначеності вимірювань [4] у числовому значенні розширеної невизначеності, яка використовується для запису результату вимірювання, і яка, по суті, є абсолютною похибкою, завжди залишають дві значущі цифри. Розширена невизначеність позначається символом U (від англійського “uncertainty” – невизначеність, непевненість) [2].

Приклади подання результатів вимірювань в теорії невизначеності вимірювань.

Отримано результати вимірювань опору та напруги зсуву (це реологічна характеристика) з відповідними значеннями розширених невизначеностей:

$R = 102,463 Ом,\ U = \pm 0,537\ Ом$;

$\tau = 21136,63 Па, U = 1552,01 Па$

Подання результатів вимірювань у цьому випадку буде мати наступний вигляд:

$R = (102,46 \pm 0,54) Ом,$

$\tau_0 = (211 \pm 16) \cdot 10^2\ Па$.

1.4. Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки

1.4.1. Визначення та нормування метрологічних характеристик ЗВТ

Як було зазначено на прочатку першого розділу, метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки можуть визначати:

- результат вимірювання;
- інструментальну похибку вимірювань.

До першої групи метрологічних характеристик відносять градуювальну характеристику ЗВТ (для вимірювальних перетворювачів вона має назву “функція перетворення”), значення однозначної і многозначної міри, ціну поділки шкали вимірювального приладу, для цифрових вимірювальних приладів: вид коду, розрядність, одиниця молодшого розряду.

Основною метрологічною характеристикою ЗВТ другої групи є його клас точності.

Всі метрологічні характеристики ЗВТ нормуються.

Нормування метрологічних характеристик – це завдання певних норм, яким вони повинні відповідати. Ці норми встановлюються нормативно-технічними документами, а метрологічні характеристики ЗВТ, які задані цими документами, називаються нормованими.

Ціль нормування метрологічних характеристик ЗВТ:

1. Забезпечення взаємозамінності ЗВТ (навіть різних типів) при виконанні вимірювань.

2. Забезпечення єдності вимірювань.

Єдність вимірювань – це такий стан вимірювань, при якому результати вимірювань виражаються в узаконених одиницях вимірювань,

похибки вимірювань відомі та із заданою ймовірністю не виходять за встановлені границі.

Існує два види нормування метрологічних характеристик ЗВТ:

- групове нормування;
- індивідуальне нормування.

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки під час їх тривалої експлуатації змінюються, що призводить до виникнення похибки вимірювання тих чи інших параметрів. Так, термоелектричні перетворювачі у процесі довготривалої роботи на об'єкті, особливо в умовах агресивного середовища, змінюють свої номінальні статичні характеристики (залежність термоелектрорушійної сили від температури) внаслідок незворотніх фізико-хімичних процесів, що відбуваються в термоелектродах термопар.

Повірка засобів вимірювальної техніки (verification) є тією операцією, яка дозволяє встановити придатність окремого “item” до виконання покладених на нього функцій [2]. Під “item” розуміється процес, методика проведення вимірювання, матеріал, склад якоїсь речовини або вимірювальна система.

1.4.2. Способи завдання класів точності ЗВТ

Класом точності називається узагальнена кількісна характеристика ЗВТ, яка визначається гарантованими границями допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками ЗВТ, що впливають на похибку (точність) вимірювань і значення яких установлюються стандартами на окремі види ЗВТ.

На сьогоднішній день стандартом, який встановлює загальні положення класифікації засобів вимірювальної техніки за класами точності, способи нормування метрологічних характеристик та умовні позначення класів точності, є [5].

Клас точності безпосередньо вказує на основну статичну похибку ЗВТ.

Конкретні способи завдання класів точності ЗВТ залежать від співвідношення у приладі адитивної та мультиплікативної похибок.

Існує три основні способи завдання класу точності ЗВТ:

1. Якщо у прилада переважає адитивна похибка, то клас точності задається зведеною похибкою

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{од}}{X_N} \cdot 100\%, \qquad (1.5)$$

де $\Delta_{од}$ – абсолютна основна допустима похибка ЗВТ;

X_N – нормуюче значення, на якому працює ЗВТ.

Умовне позначення класу точності на приладі у цьому разі – **1,5.**

2. Якщо у прилада переважає мультиплікативна похибка, то клас точності задається через відносну похибку

$$\delta_{од} = \pm \frac{\Delta_{од}}{X} \cdot 100\%, \qquad (1.6)$$

де $\Delta_{од}$ – абсолютна основна допустима похибка ЗВТ;

X – результат вимірювання (показ приладу).

Умовне позначення класу точності на приладі –

.

3. Якщо у прилада адитивна та мультиплікативна похибки є такими, що можуть бути співставленими, то клас точності задається у вигляді c/d і можна розрахувати допустиме значення відносної похибки за двочленною формулою

$$\delta_{од} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_к}{X} \right| - 1 \right) \right], \qquad (1.7)$$

де $\delta_{од}$ – допустиме значення основної відносної похибки;

$X_к$ – кінцеве значення, на якому працює прилад;

X – результат вимірювання (показ приладу);

c та d – числа, які обираються зі стандартизованого ряду значень для завдання класів точності ЗВТ ($c > d$).

Співвідношення c та d знаходиться у таких границях:

$$2 \le \frac{c}{d} \le 20.$$

[5] встановлює стандартизований ряд значень для завдання класів точності ЗВТ:

$[1; 1{,}5; (1{,}6); 2; 2{,}5; (3); 4; 5; 6;] \cdot 10^{\,l}$, l = 1; 0; –1; –2…

Приклади розв'язання задач на різні способи завдання класів точності ЗВТ.

ЗАДАЧА 1

Клас точності цифрового омметра заданий у вигляді 0,02/0,002. Його границя вимірювання 1000. Виміряне значення опору дорівнює $734{,}78\,\text{кОм}$.

Клас точності амперметра позначений на приладі як

. Виміряне значення струму дорівнює 0,527 А. З'ясуйте, який прилад забезпечує найбільшу точність вимірювання, запишіть результати вимірювань.

$c = 0{,}02\ \%$ $d = 0{,}002\ \%$ $R_к = 1000\,\text{кОм}$ $R = 734{,}78\,\text{кОм}$ $\delta_A = \pm 0{,}5\ \%$ $I = 0{,}527\,\text{А}$	Розв'язання: Розраховуємо допустиме значення відносної похибки вимірювання опору за формулою $\delta_{од} = \pm\left[c + d\left(\left\lvert\frac{\text{X}_к}{\text{X}}\right\rvert - 1\right)\right],$ Підставляємо вихідні дані $\delta_{од} = \pm\left[0{,}02 + 0{,}002\left(\left\lvert\frac{1000}{734{,}78}\right\rvert - 1\right)\right] = \pm 0{,}0204\,\%$
$\delta_A,\ \delta_R - ?$ $R_0, I_0 - ?$	

Використовуємо формулу відносної похибки для отримання значення абсолютної похибки вимірювання опору

$$\delta = \pm\frac{\Delta X}{X}\cdot 100\%,\ \Delta\text{X} = \pm\frac{\delta\cdot\text{X}}{100\%}$$

Значення абсолютної похибки вимірювання опору після підставлення розрахованого значення відносної похибки вимірювання опору становитиме

$$\Delta R = \pm\frac{\delta\cdot R}{100\%} = \pm\frac{0{,}0204\cdot 734{,}78}{100\%} = \pm 0{,}1499\,\text{Ом} \approx \pm 0{,}15\,\text{Ом}.$$

Для другого приладу, амперметра, розраховуємо абсолютну похибку вимірювання струму, використовуючи формулу відносної похибки

$$\delta = \pm\frac{\Delta X}{X}\cdot 100\%,$$

$$\Delta I = \pm\frac{\delta\cdot I}{100\%} = \pm\frac{0{,}5\cdot 0{,}527}{100\%} = \pm 0{,}002635\,\text{А} \approx \pm 0{,}0026\,\text{А}.$$

Для того, щоб визначити, який прилад забезпечує найбільшу точність вимірювання, треба співставити дві відносні похибки: відносну похибку вимірювання опору та відносну похибку вимірювання струму. Відносна похибка вимірювання струму задана класом точності амперметра і дорівнює $\pm 0{,}5\%$. Розраховане значення відносної похибки вимірювання опору склало $\pm 0{,}0204\,\%$. Оскільки значення відносної похибки вимірювання опору менше, ніж значення відносної похибки вимірювання струму $\delta_R < \delta_A$, то вимірювання опору виконано з більшою точністю.

Подання двох результатів вимірюванн опору та струму має вигляд:

$$R_0 = (734{,}78 \pm 0{,}15)\,\text{Ом},\ I_0 = (0{,}5270 \pm 0{,}0026)\,\text{А}.$$

ЗАДАЧА 2

Напруга вимірюється вольтметром із класом точності 1,0 та кінцевим значенням 100 В. Отримано два значення напруги: 45,247 В і 83,561 В. Порівняйте результати вимірювань за точністю, запишіть результати вимірювань.

$\delta_A = \pm 1{,}0\,\%$ $U_к = 100\,\text{В}$ $U_1 = 45{,}247\,\text{В}$ $U_2 = 83{,}561\,\text{В}$	Розв'язання: Знаходимо абсолютні похибки вимірювання напруги із формули для відносної похибки $\delta = \pm\dfrac{\Delta X}{X}\cdot 100\%$
$\delta_{U_1},\ \delta_{U_2} - ?$ $U_{10}, U_{20} - ?$	$\Delta U_1 = \pm\dfrac{\delta\cdot U}{100\%} = \pm\dfrac{1{,}0\cdot 45{,}247}{100\%} = \pm 0{,}4525\,\text{В}$

$$\Delta U_2 = \pm\frac{\delta\cdot U}{100\%} = \pm\frac{1{,}0\cdot 83{,}561}{100\%} = \pm 0{,}8356\,\text{В}$$

Оскільки точність вимірювання визначається відносною похибкою, то два результати вимірювання напруги матимуть однакову точність, яка обумовлена класом точності вольтметра і дорівнює $\delta_A = \pm 1{,}0\,\%$.

Подання двох результатів вимірювань напруги здійснюється наступним чином:

$$U_{10} = (45{,}2 \pm 0{,}5)\,\text{В},\ U_{20} = (83{,}6 \pm 0{,}8)\,\text{В}.$$

ЗАДАЧА 3

Частота вимірюється частотоміром із класом точності 1,0 та діапазоном вимірювання (40-60) Гц. Отримано два значення частоти: 49,235 Гц та 50,6849 Гц. Співставьте результати вимірювань за точністю, запишіть результати вимірювань.

$\gamma = \pm 1{,}0\,\%$ $f_N = 50\,\text{Гц}$ $f_1 = 49{,}235\,\text{Гц}$ $f_2 = 50{,}849\,\text{Гц}$	Розв'язання: Оскільки клас точності частотоміра заданий зведеною похибкою, використовуємо формулу зведеної похибки для визначення абсолютної похибки вимірювання частоти: $\gamma = \pm\dfrac{\Delta X}{X_N}\cdot 100\%,\ \Delta X = \pm\dfrac{\gamma\cdot X_N}{100\%}$
$\delta_1,\ \delta_2 - ?$ $f_{10}, f_{20} - ?$	Розраховуємо абсолютні похибки для двох результатів вимірювання частоти (вони матимуть однакові значення):

$$\Delta X_1 = \Delta X_2 = \pm\frac{\gamma\cdot X_N}{100\%} = \pm\frac{1{,}0\cdot 50}{100\%} = \pm 0{,}5\,\text{Гц}$$

Для співставлення двох результатів вимірювань за точності розраховуємо відносні похибки за формулою

$$\delta = \pm\frac{\Delta X}{X}\cdot 100\%$$

$$\delta_1 = \pm\frac{\Delta f_1}{f_1}\cdot 100\% = \pm\frac{0{,}5}{49{,}235}\cdot 100\% = \pm 1{,}01\ \%,$$

$$\delta_2 = \pm\frac{\Delta f_2}{f_2}\cdot 100\% = \pm\frac{0{,}5}{50{,}849}\cdot 100\% = \pm 0{,}98\ \%.$$

Другий результат вимірювання має більшу точність, оскільки його відносна похибка менша, ніж у першого результату вимірювання ($\delta_2 < \delta_1$).

Подання двох результатів вимірювань частоти має вигляд:

$$f_{10} = (49{,}2 \pm 0{,}5)\,\text{Гц},\ f_{20} = (50{,}8 \pm 0{,}5)\,\text{Гц}.$$

1.5. Визначення сумарної невилученої похибки вимірювань

До невилучених систематичних похибок (НСП) відносять систематичні похибки, для яких неможливо встановити або чисельне значення, або знак. До НСП відносять також залишки систематичних

похибок, які залишаються після їх усунення. НСП вважаються випадковими похибками, розподіленими за прямокутним (або рівномірним) законом (підрозділ 2.2.2).

Для НСП використовують два правила підсумовування:

1. Арифметичне підсумовування НСП (для числа складників НСП $m \le 4$).

Допустиме значення (або границі) сумарної НСП визначають за формулою:

$$\Theta_{\partial} = \pm \sum_{j=1}^{m} \left| \Theta_{\partial j} \right|, \tag{1.8}$$

де $\Theta_{\partial j}$ – допустиме значення (або границі) j-го складника НСП;

m – число складників НСП;

Θ_{∂} – допустиме значення (або границі) сумарної НСП.

2. Геометричне (статистичне) підсумовування НСП (для числа складників НСП $m \le 4$).

$$\Theta_{\partial} = \pm k_{\Theta} \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_{\partial j}^{2}}, \tag{1.9}$$

де k_{Θ} (або k_P) – коефіцієнт, який залежить від трьох величин:

– від довірчої імовірності похибки P_{∂} або рівня значущості $\alpha = 1 - P$;

– від числа складників НСП;

– від співвідношення сусідніх значень $\Theta_{\partial j}$, розташованих або за зростанням або за зменшенням.

Коефіцієнт k_{Θ} для різних значень ймовірності:

для $P = 0{,}90$ $k_{\Theta} = 0{,}85 (m \ge 2)$;

для $P = 0{,}95$ $k_{\Theta} = 1{,}12 (m \ge 2)$;

для $P = 0{,}99$ $k_{\Theta} = 1{,}42 (m \ge 4)$.

Арифметичне значення сумарної невилученої систематичної похибки Θ_{∂} дає дещо завищену оцінку, тобто більш грубу і цей спосіб використовують у разі числа складників НСП $m \le 4$. Проте, якщо необхідно забезпечити більш високу гарантію похибки, обчислюють і арифметичне і геометричне Θ_{∂}, і з них обирають те, що має більше значення.

1.6. Практичні завдання з визначення сумарної невилученої систематичної похибки вимірювань

Приклад розв'язання задач на підсумовування невилучених систематичних похибок для конкретного засобу вимірювальної техніки.

Клас точності цифрового вольтметра заданий у вигляді 1,0/0,1. Його границя вимірювання 10 В. Виміряне значення напруги дорівнює 2,6435 В.

У технічному опису до приладу вказано, що границя допустимої температурної похибки дорівнює границі основної похибки.

Необхідно визначити допустиме значення (або границі) сумарної невилученої систематичної похибки вимірювання напруги (НСП) для ймовірності $P = 0{,}95$.

$c = 1{,}0\ \%$ $d = 0{,}1\ \%$ $U_к = 10\,\text{В}$ $U = 2{,}6435\,\text{В}$ $\delta_{од} = \delta_t$ $\delta_A = \pm 0{,}5\ \%$ $I = 0{,}527\,\text{А}$	Розв'язання: Розраховуємо допустиме значення основної відносної похибки вимірювання напруги за формулою $\delta_{од} = \pm\left[c + d\left(\left\lvert \frac{X_к}{X} \right\rvert - 1 \right) \right],$ Підставляємо вихідні дані $\delta_{од} = \pm\left[1{,}0 + 0{,}1\left(\left\lvert \frac{10}{2{,}6435} \right\rvert - 1 \right) \right] = \pm 1{,}2783\,\%$
$\Theta_д - ?$	

Оскільки зазначено, що границя допустимої температурної похибки дорівнює границі основної похибки, то границя допустимої температурної похибки буде теж дорівнювати $\delta_t = \pm 1{,}2783\,\%$.

Із формули для відносної похибки знаходимо два значення: основної абсолютної похибки та додаткової (температурної) абсолютної похибки.

$$\delta = \pm \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%$$

$$\Delta X_{од} = \theta_t = \pm \frac{\delta \cdot X}{100\%} = \pm \frac{1{,}2783 \cdot 2{,}6435}{100\%} = \pm 0{,}0338\,\text{В}.$$

Використовуємо формулу для розрахунку сумарної невилученої систематичної похибки

$$\Theta_{\partial} = \pm k_{\Theta} \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_{\partial j}^2}$$

Коефіцієнт k_{Θ} для імовірності $P = 0{,}95$ дорівнює $k_{\Theta} = 1{,}12$.

$$\Theta_{\partial} = \pm 1{,}12 \sqrt{(0{,}0338)^2 + (0{,}0338)^2} = \pm 0{,}05258\,\text{В}.$$

Отже, значення сумарної невилученої систематичної похибки після заокруглення дорівнює $\theta_{\partial} = \pm 0{,}05\,\text{В}$.

Задачі для самостійного розв'язання студентами

Індивідуальні завдання для розрахунку сумарної невилученої систематичної похибки наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку сумарної невилученої систематичної похибки Θ_{∂} засобу вимірювальної техніки

№ варіанта	Тип прилада	Клас точності (позначення на приладі або зазначення в технічному опису)	Результат вимірювання $X_{вим}$	Кінцеве значення $X_{к}$	Завдання границі додаткової температурної похибки
1	В7-34 (вольтметр цифровий)	0,02/0,01	0,0853 В	0,1 В	Границя додаткової температурної похибки дорівнює границі основної похибки
2		0,015/0,002	0,6523 В	1 В	
3		0,015/0,002	83,645 В	100 В	

4		0,015/0,002	792,61 В	1000 В	
5		0,01/0,002	8,4325 В	10 В	
6		0,5/0,1	0,6812 В	1 В	
7		0,5/0,1	9,2683 В	10 В	
8		0,1/0,05	0,8175 В	1 В	
9		0,15/0,05	7,2496 В	10 В	
10		0,25/0,05	543,27 В	1000 В	
11	М-377 (мілі-амперметри, амперметри, кіло-амперметри і вольтметри)	1,5	7,8 мА	10 мА	Зміна показів приладів, спричинена відхиленням температури оточуючого повітря від нормальної на кожні 10К, не перевищує 1,2% від показу приладу
12		1,5	28,3 мА	30 мА	
13		1,5	45,7 мА	50 мА	
14		1,5	72,5 мА	75 мА	
15		1,5	95,6 мА	100 мА	
16	Ц 33-М1 (амперметри та вольтметри)	2,5	0,2875 А	0,5 А	Границя допустимої температурної похибки, спричиненої зміною температури оточуючого повітря від нормальної до будь-якої на

					кожні $10^0 C$ зміни температури, дорівнює 0,8 границі допустимої основної похибки
17		2,5	0,925 А	1 А	
18		2,5	2,125 А	2,5 А	
19		1,5	97,5 В	100 В	
20		1,5	206,25 В	250 В	
21	Э-59 (амперметр)	0,5	1,6825	2,5 А	Границя допустимої додаткової похибки амперметру на змінному струмі у разі відхилення частоти від нормальної області до будь-якого значення частоти у робочій області частот дорівнює допустимій границі основної похибки
22		0,5	1,1325	2,5 А	

23		0,5	0,6125	2,5 А	
24		0,5	2,08	2,5 А	
25		0,5	2,3675	2,5 А	
26		0,5	1,4525	2,5 А	
27		0,5	0,8675	2,5 А	
28		0,5	2,1375	2,5 А	
29		0,5	1,9575	2,5 А	
30		0,5	2,405	2,5 А	

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Групи умов експлуатації засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).
2. Класифікація похибок вимірювань.
3. Класифікація похибок ЗВТ.
4. Яка похибка визначає точність результатів вимірювань?
5. Похибка взаємодії. Розрахункова формула для обчислення відносної похибки взаємодії, яка виникає при вимірюванні струму в електричному колі за допомогою амперметру.
6. Показники якості результатів вимірювань.
7. Нормування метрологічних характеристик ЗВТ.
8. Метрологічні характеристики ЗВТ, які визначають результат вимірювання та похибку вимірювання.
9. Способи завдання класів точності ЗВТ.
10. Подання результату вимірювання.
11. Способи підсумовування похибок вимірювань.

РОЗДІЛ 2. ІМОВІРНІСНІ І СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ І ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

Оскільки результати і похибки вимірювань (повна та випадкова) є випадковими величинами, для їх оцінювання застосовуються методи теорії імовірностей та математичної статистики.

Імовірнісні характеристики результатів і похибок вимірювань – це характеристики, отримані з генеральної сукупності, тобто з нескінченого числа результатів вимірювань. Тому ці характеристики є детермінованими (невипадковими та ідеальними).

Імовірнісні характеристики приймаються за дійсне значення, але реалізувати їх фізично неможливо, тому від ймовірнісних характеристик переходять до статистичних, які представляють собою деяке наближення до ймовірнісних.

Статистичні характеристики – характеристики, які визначають з використанням кінцевого числа результатів вимірювань, тому статистичні характеристики є випадковими величинами.

Статистичні характеристики називають оцінками імовірнісних характеристик.

Серед статистичних характеристик найбільш застосовуваними є наступні: оцінка математичного сподівання результатів вимірювань $\hat{M}_X$, оцінка дисперсії результатів вимірювань $\hat{D}_X$ та оцінка середнього квадратичного відхилення (СКВ) результатів вимірювань $\hat{S}_X$.

У реальній практиці метрологія має справу зі статистичними характеристиками.

Оцінки математичного сподівання, дисперсії та середнього квадратичного відхилення результатів вимірювань є точковими оцінками, тобто такими, які представляються одним числом.

Крім точкових оцінок виділяють інтервальні оцінки.

Інтервальною оцінкою випадкової похибки вимірювань, яка неодмінно присутня в результатах вимірювань, називають характеристику функції щільності ймовірностей випадкової похибки, що являє собою інтервал, в якому з відомою довірчою ймовірністю знаходиться ця похибка.

2.1. Закони розподілу випадкових величин

2.1.1. Інтегральний та диференційний закони розподілу похибок і результатів вимірювань

Закони розподілу є найбільш повною характеристикою результатів і похибок вимірювань, як і інших випадкових величин. Вони описуються із використанням параметрів, які характеризують заданий розподіл. Параметри розподілів виражаються через начальні та центральні моменти різних порядків.

На практиці використовуються тільки начальний момент першого порядку, який називається математичним сподіванням M_X, та центральний момент другого порядку – дисперсія D_X.

Середнє квадратичне відхилення результату вимірювань як випадкової величини представляє собою позитивний корінь із дисперсії:

$$S_X = +\sqrt{D_X}\ . \tag{2.1}$$

Середнє квадратичне відхилення для окремих результатів вимірювань з багаторазовими спостереженнями обчислюється за наступною формулою:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \tag{2.2}$$

де x_i – і-ий результат вимірювань;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне значення результатів вимірювань;

n – число вимірювань.

Середнє квадратичне відхилення результату вимірювань, за яке приймається середнє арифметичне значення, розраховується за формулою:

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \tag{2.3}$$

де x_i – і-ий результат вимірювань;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне значення результатів вимірювань;

n – число вимірювань.

Для описування випадкових величин використовують два види законів розподілу:

- *інтегральний закон* (функція розподілу імовірності (ФРІ))

$$F(X)=\int_{-\infty}^{\infty} f(X)dX,$$

- *диференційний закон* (функція щільності розподілу імовірності (ФЩРІ))

$$f(X)=\frac{\partial F(X)}{\partial X}=\frac{\Delta F(X)}{\Delta X}$$

Аналогічним є запис законів для повної та випадкової похибок.

Функція розподілу ймовірності результату вимірювань – це залежність імовірності того, що деякий будь-який результат вимірювань X_i не перебільшить деякого заданого значення X, від заданого значення вимірюваної величини X.

$$F(X)=P[X_i \le X]=P[-\infty \le X_i \le X],$$

Аналогічно формулюється визначення для повної та випадкової похибок вимірювань.

На рис. 1 а) зобразимо функцію розподілу імовірності результатів вимірювань. Позначимо деяку точку X_i – істинне значення вимірюваної величини. Крива функції змінюється від $-\infty$ *до* $+\infty$. За $X \to -\infty$ крива, $\to 0$ за $X \to +\infty$ крива $\to 1$. На графіку точка А – точка перегибу функції. Для кривої 1 $\Delta_S = 0$, для кривої 2 $\Delta_S \neq 0$.

Особливості функції розподілу імовірності результатів вимірювань як випадкових величин.

1. Приймається, що крива цієї функції є безперервною.
2. Функція є позитивною.
3. Функція (її крива) має універсальний вигляд.
4. Фізично ця функція не має сенсу в нескінчених границях, оскільки результати вимірювань знаходяться у деяких певних границях.
5. Результати вимірювань групуються:

а) біля істинного значення вимірюваної величини, якщо $\Delta_S = 0$;

б) біля математичного сподівання результатів вимірювань, якщо $\Delta_S \neq 0$.

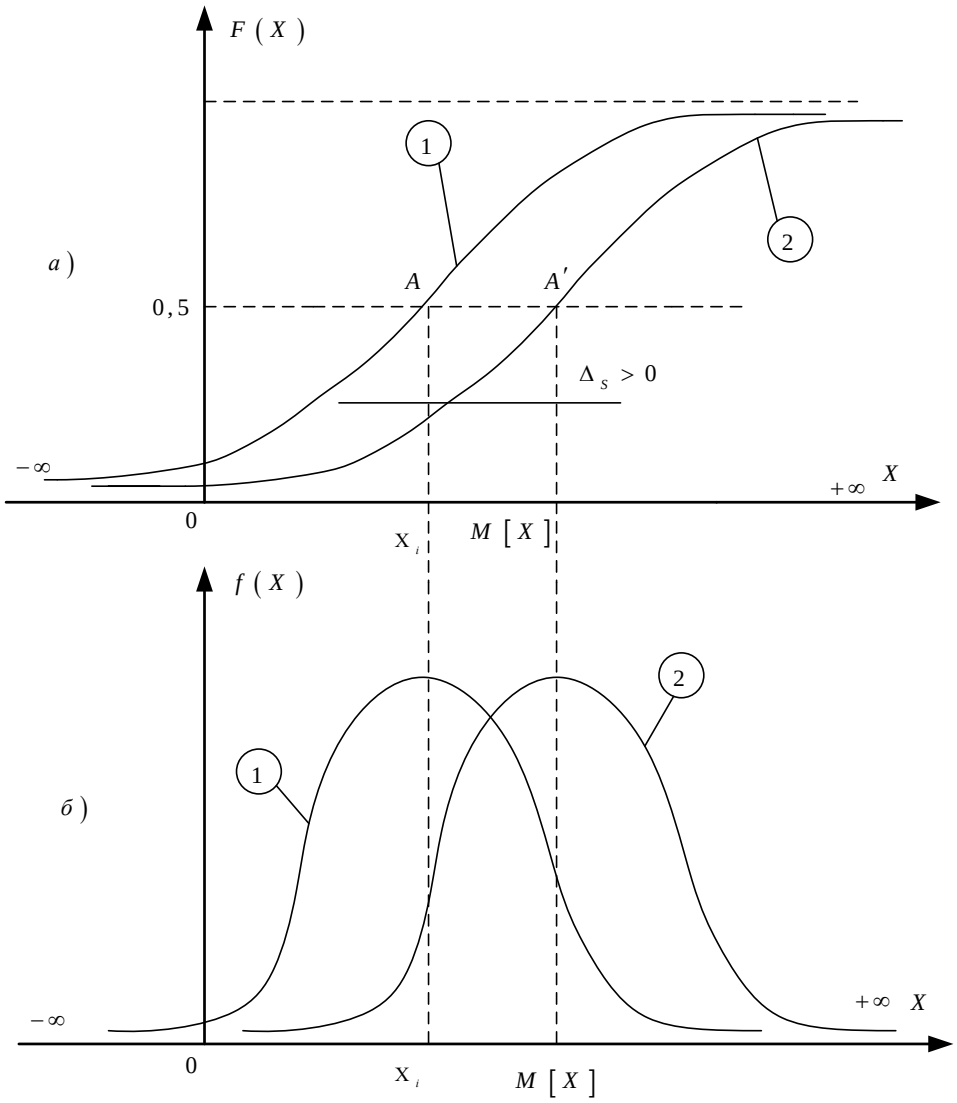


Рисунок 2.1 – ФРІ и ФЩРІ результатів вимірювань

Особливості функції щільності розподілу імовірності результатів вимірювань:

1. Функція позитивна.

2. Крива функції не має універсальної форми.

3. Площа під кривою функції щільності розподілу імовірності будь-якої форми завжди дорівнює одиниці (це ймовірность того, що результат або похибка вимірювань будуть знаходитися в інтервалі $\left[-\infty \le X_i \le +\infty\right]$).

4. Функція результатів вимірювань розташовується симетрично відносно X_i, якщо $\Delta_S = 0$, и симетрично відносно M_X, якщо $\Delta_S \neq 0$.

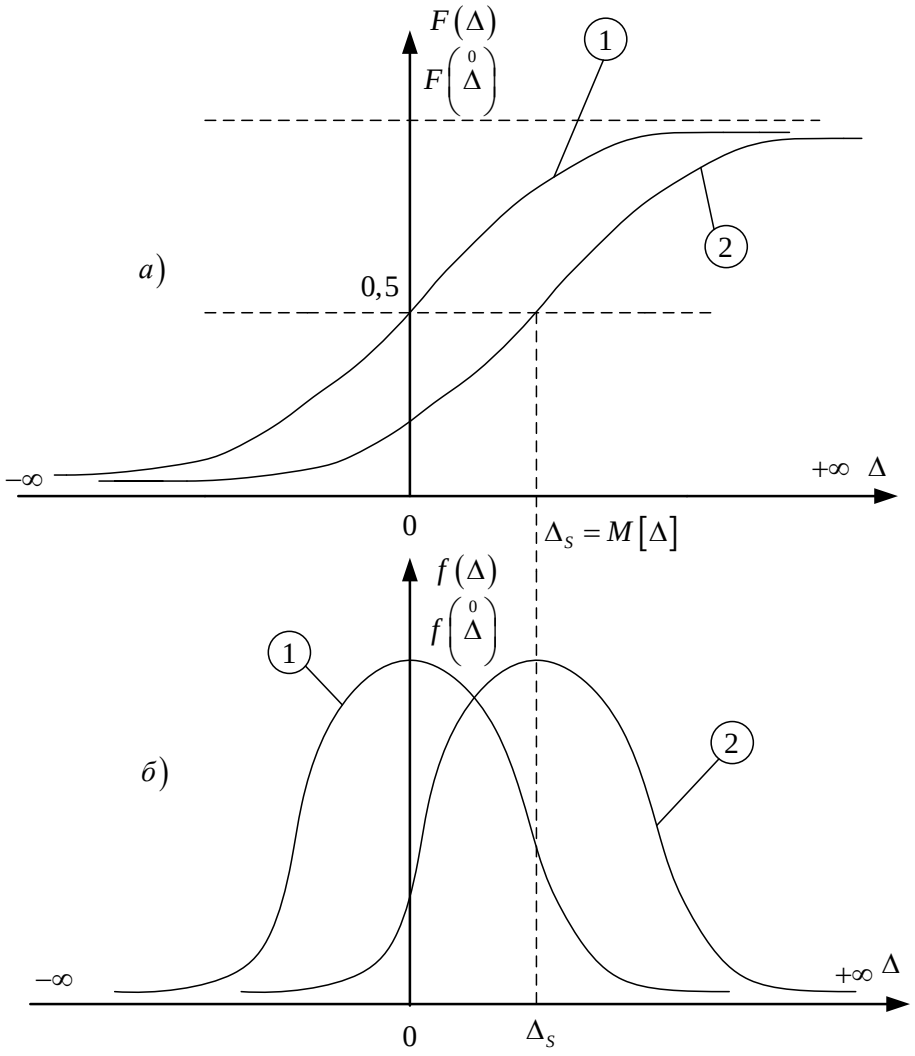


Рисунок 2.2 – ФРІ и ФЩРІ похибок вимірювань

Розмірності функцій розподілу:

1) інтегральний закон (ФРІ) – безрозмірна (це імовірність).

2) диференційний закон (ФЩРІ) - $\frac{1}{X}$ (розмірність, зворотня розмірності вимірюваної величини).

2.1.2. Визначення імовірності знаходження випадкової величини у заданому інтервалі

Це питання є найважливішим при визначенні довірчого інтервалу (довірчих границь) результатів і похибок вимірювань.

Використовується два способи визначення цієї імовірності:

1) За функцією розподілу ймовірності (менш розповсюджений)

$$P\left[\overset{0}{\Delta}_1 < \overset{0}{\Delta} \le \overset{0}{\Delta}_2\right] = F\left(\overset{0}{\Delta}_2\right) - F\left(\overset{0}{\Delta}_1\right) \qquad (2.4)$$

Імовірність потрапляння випадкової похибки у заданий інтервал дорівнює різниці між значеннями функцій розподілу імовірності у точках $\overset{0}{\Delta}_1$ та $\overset{0}{\Delta}_2$.

Аналогічно визначається імовірность знаходження результатів вимірювань і повної похибки у заданому інтервалі.

2) За функцією щільності розподілу імовірності (найбільш розповсюджена задача)

$$P\left[\overset{0}{\Delta}_1 < \overset{0}{\Delta} \le \overset{0}{\Delta}_2\right] = \int_{\overset{0}{\Delta}_1}^{\overset{0}{\Delta}_2} f\left(\overset{0}{\Delta}\right) d\overset{0}{\Delta} \qquad (2.5)$$

2.2. Диференційні закони розподілу випадкових величин

Найбільше розповсюдження при оцінки похибок вимірювань знаходять наступні функцією щільності розподілу імовірності:

-нормальний закон розподілу

- рівномірний (прямокутний) закон розподілу

-трикутний закон розподілу

-розподіл Лапласа

-розподіл Коші

2.2.1. Нормальний закон розподілу похибок і результатів вимірювань

Нормальний закон розподілу широко використовується при статистичній обробці результатів вимірювань через наступні обставини:

1) більшість похибок вимірювань та ЗВТ розподілені за нормальним законом;

2) якщо вимірювання або ЗВТ містить 5 або більше похибок і серед них немає домінуючої похибки, то розподіл суми цих похибок буде нормальним за будь-яких законах розподілу похибок-складників.

А) Форми завдання нормального закону розподілу імовірності результатів та похибок вимірювань.

Використовують три ідентичні форми аналітичного запису закону:

1. Нормальний закон для результатів вимірювань

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_x} e^{-\frac{(X-M_X)^2}{2S_x^2}}$$

де X – результати вимірювань;

M_X – математичне сподівання результатів вимірювань;

S_X – середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань;

S_X^2 – дисперсия результатов измерений;.

S_Δ – середнє квадратичне відхилення повної похибки;

$S_{\overset{o}{\Delta}}$ – середнє квадратичне відхилення випадкової похибки;

$\overset{0}{\Delta} = X - M_X$ – випадкова похибка вимірювань

2. Нормальний закон для випадкової похибки

$$f(\overset{o}{\Delta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\overset{o}{\Delta}}} e^{-\frac{\overset{o}{\Delta}^2}{2S_{\overset{o}{\Delta}}^2}}$$

3. Нормальний закон для повної похибки Δ

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_\Delta} e^{-\frac{(\Delta-\Delta_S)^2}{2S_\Delta^2}}$$

Співвідношення СКВ результатів вимірювань, СКВ випадкової похибки та СКВ повної похибки:

$$S_X = S_{\overset{o}{\Delta}} = S_\Delta = S$$

Всі середні квадратичні відхилення S (S_X, $S_{\overset{o}{\Delta}}$, S_Δ) однакові, оскільки всі закони однакові.

Середнє квадратичне відхилення зумовлено та визначається тільки випадковою похибкою.

Б) фізичне значення параметрів нормального закону розподілу:

1. математичне сподівання результатів вимірювань M_X і повної похибки M_Δ.

2. середнє квадратичне відхилення (або дисперсія).

Фізичне значення математичного сподівання:

математичне сподівання зміщує відповідну криву закона паралельно до самої собі уздовж осі абсцис:

-для результата вимірювань на величину M_X;

-для повної похибки – на величину $\Delta_S = M[\Delta]$.

Крива функції щільності розподілу імовірності визначається тільки випадковою похибкою $\overset{0}{\Delta}$.

Фізичне значення середнього квадратичного відхилення:

середнє квадратичне відхилення характеризує розкід (розсієння) результатів або похибок вимірювань відносно відповідного математичного сподівання.

Чим більше значення S, тим більше результатів вимірювань з більшими похибками. У разі зменшення значення S число таких результатів зменшується, та зростає число результатів вимірювань з меншими за значеннями похибками.

2.2.2. Прямокутний закон розподілу похибок і результатів вимірювань

Прямокутний закон використовується для оцінки наступних похибок:

1. Для оцінки похибок округлення при відліку показів зі шкал стрєлкових приладів;

2. Для оцінки похибки квантування в цифрових вимірювальних приладах;

3. Для оцінки невилучених систематичних похибок.

На рисунку рівномірного закону розподілу (рисунок 2.3) похибки вимірювань Δ_1 та Δ_2 – це границі, в яких похибка Δ з однаковою імовірністю може приймати будь-яке значення. При цьому значення щільності розподілу імовірності випадкової похибки $\overset{o}{f}(\Delta)$ у цих границях є постійним і дорівнює $1/(\Delta_2 - \Delta_1)$, а поза ними дорівнює нулю. Значення $1/(\Delta_2 - \Delta_1)$ розраховується, виходячи з того, що вся площа під кривою (прямокутником) щільності розподілу імовірності $\overset{o}{f}(\Delta)$ дорівнює 1 (це

імовірність потрапляння похибки в інтервал $\Delta_1 \le \Delta \le \Delta_2$), а основа обчислюється як $\Delta_2 - \Delta_1$.

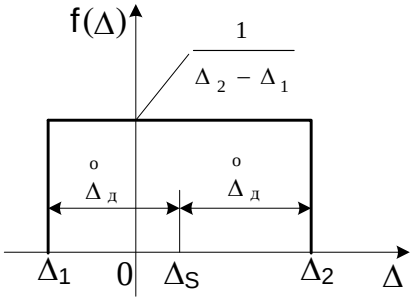


Рисунок 2.3 – Рівномірний закон розподілу повної похибки вимірювань

$$f(\Delta) = \begin{cases} 0 & при \quad \Delta \le \Delta_1, \\ \dfrac{1}{\Delta_2 - \Delta_1} & при \quad \Delta_1 \le \Delta \le \Delta_2, \\ 0 & при \quad \Delta > \Delta_2, \end{cases}$$

Основні кількісні характеристики рівномірного закону розподілу похибок:

- систематична похибка

$$\Delta_S = M[\Delta] = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}; \qquad (2.6)$$

- дисперсія похибки

$$D[\Delta] = D[\overset{o}{\Delta}] = \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)^2}{12} = \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)^2}{2\sqrt{3}} = \frac{\varepsilon^2}{2\sqrt{3}} = \frac{\overset{o}{\Delta}{}_Д^2}{3}, \qquad (2.7)$$

де $\varepsilon = \Delta_2 - \Delta_1$ – довірчий інтервал випадкової похибки;

$\overset{o}{\Delta}_Д$ – довірчі границі випадкової похибки.

Для симетричних границь $(\Delta_2 = \Delta_1, \Delta_S = 0)$ середнє квадратичне відхилення похибки розраховується за формулою:

$$S[\Delta] = \frac{\overset{0}{\Delta}_Д}{\sqrt{3}}. \qquad (2.8)$$

2.2.3. Трикутний закон розподілу похибок і результатів вимірювань

Цей закон отримують у разі підсумовування двох незалежних похибок з однаковим рівномірним законом розподілу. Графік трикутного закону розподілу повної похибки вимірювань зображений на рисунку 2.4.

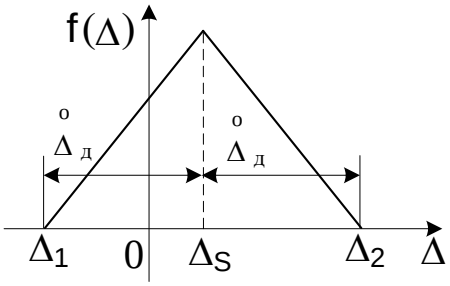


Рисунок 2.4 – Трикутний закон розподілу повної похибки вимірювань

$$f(\Delta)=\begin{cases} 0 & \text{при} \quad \Delta \le \Delta_1; \\ \dfrac{4(\Delta-\Delta_1)}{(\Delta_2-\Delta_1)^2} & \text{при} \quad \Delta_1 < \Delta \le \dfrac{\Delta_1+\Delta_2}{2}; \\ \dfrac{4(\Delta_2-\Delta)}{(\Delta_2-\Delta_1)^2} & \text{при} \quad \dfrac{\Delta_1+\Delta_2}{2} < \Delta \le \Delta_2; \\ 0 & \text{при} \quad \Delta > \Delta_2. \end{cases}$$

Основні кількісні характеристики трикутного закону розподілу похибок:

- систематична похибка

$$\Delta_S = M[\Delta] = \frac{\Delta_1+\Delta_2}{2}; \tag{2.9}$$

- дисперсія похибки

$$D[\overset{o}{\Delta}] = \frac{(\Delta_2-\Delta_1)^2}{24} = \frac{\varepsilon^2}{24} = \frac{\overset{o}{\Delta}{}^2_{Д}}{6}; \tag{2.10}$$

- середнє квадратичне відхилення похибки

$$S_{\overset{o}{\Delta}} = \frac{\overset{o}{\Delta}_{Д}}{\sqrt{6}} \tag{2.11}$$

Приклад розв'язання задачі на рівномірний закон розподілу похибки вимірювання.

Похибка вимірювання напруги розподілена за рівномірним законом та знаходиться у границях $\Delta_1 = -1{,}3\text{В};\ \Delta_2 = 1{,}1\text{В}$.

Необхідно:

1. Зобразити диференційний та інтегральний закони похибки вимірювання напруги.
2. Визначити значення систематичної складової похибки вимірювання напруги та середньоквадратичного відхилення.
3. Визначити ймовірність знаходження похибки вимірювання напруги в інтервалі $[-1{,}2 \le \Delta \le 1{,}2]\text{В}$.

Розв'язання:

1. Зобразимо диференційну та інтегральну функції розподілу похибки вимірювання напруги ($f(\Delta)$ та $F(\Delta)$), рис. 2.5.

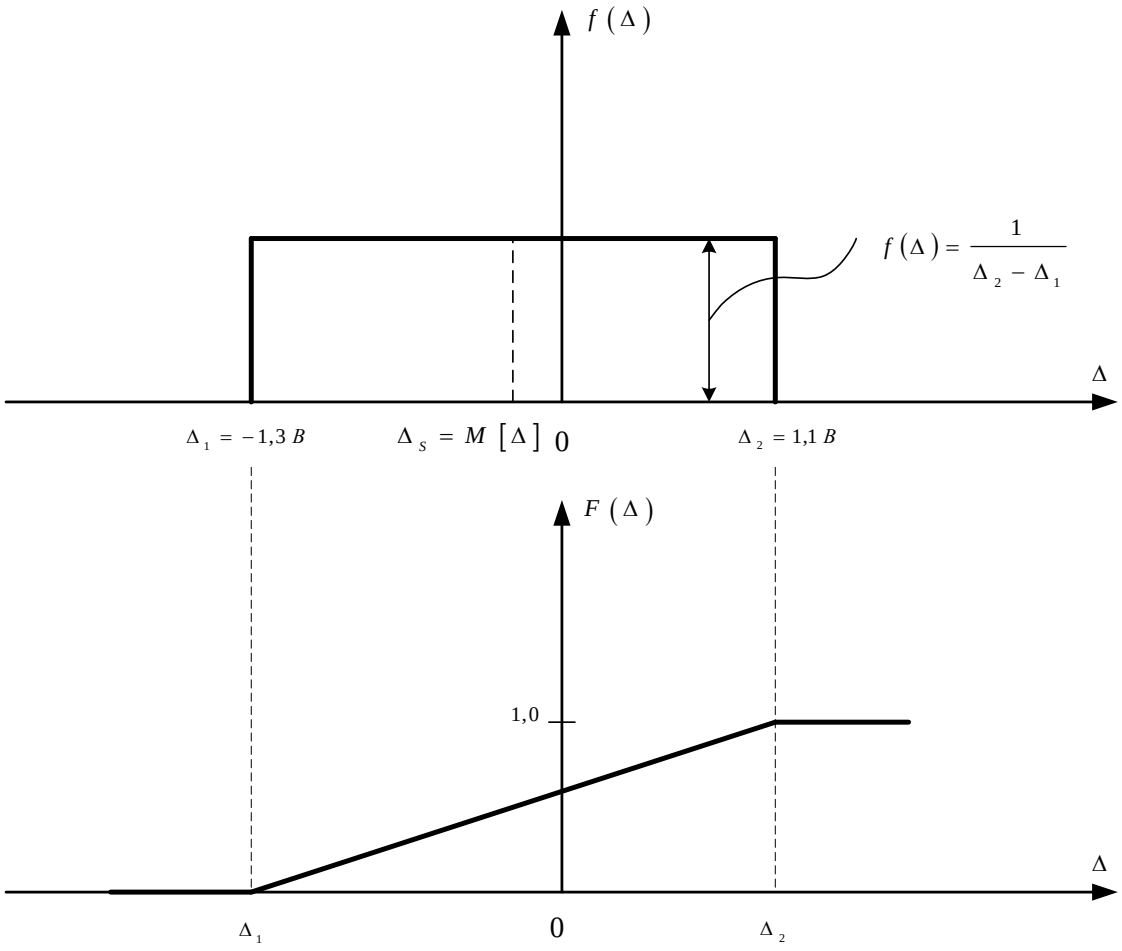


Рисунок 2.5 – Графіки диференційної та інтегральної функцій розподілу похибки вимірювання напруги

2. Розраховуємо кількісні характеристики заданого рівномірного закону розподілу похибок:

- систематична похибка за формулою (2.6)

$$\Delta_S = M[\Delta] = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{-1{,}3 + 1{,}1}{2} = -0{,}1\text{B};$$

- середнє квадратичне відхилення похибки за формулою (2.7)

$$S[\Delta] = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{12}} = \frac{1{,}1 - (-1{,}3)}{2\sqrt{3}} = 0{,}693\text{В}$$

3. Визначаємо імовірність знаходження похибки вимірювання напруги в інтервалі $[-1{,}2 \le \Delta \le 1{,}2]$В.

Відповідно до формули (2.5) ця імовірність буде розраховуватися наступним чином

$$P[-1{,}2 < \Delta \le 1{,}2] = \int_{-1,2}^{1,2} f(\Delta)d\Delta = \int_{-1,2}^{1,1} f(\Delta)d\Delta + \int_{1,1}^{1,2} f(\Delta)d\Delta = 0{,}417 \int_{-1,2}^{1,1} d\Delta =$$

$$= 0{,}417 \cdot \Delta_{-1,2}^{1,1} | = 0{,}417 \cdot (1{,}1 + 1{,}2) = 0{,}9591$$

Пояснення: інтеграл розбивається на 2 інтеграли, тому що в інтервалі імовірного знаходження похибки $[-1{,}2 < \Delta \le 1{,}2]$ функція $f(\Delta)$ має різні значення (в інтервалі $[1{,}1 < \Delta \le 1{,}2]$ вона дорівнює 0).

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Особливості інтегрального та диференційного законів розподілу результатів та похибок вимірювань.

2. Яку розмірність мають диференційний та інтегральний закони розподілу випадкових величин?

3. Нормальний закон розподілу випадкових величин. Його чисельні характеристики (математичне сподівання, дисперсія, середнє квадратичне відхилення).

4. Вирази нормального розподілу для результатів вимірювань, випадкової похибки та повної похибки.

5. Рівномірний закон розподілу результатів вимірювань та похибок вимірювань. Його чисельні характеристики.

6. Трикутний закон розподілу випадкових величин. Його чисельні характеристики.

7. Формула для визначення ймовірності знаходження випадкової похибки в інтервалі $\left[\overset{0}{\Delta}_1 \le \overset{0}{\Delta} \le \overset{0}{\Delta}_2\right]$ у разі завдання диференційної функції.

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

3.1. Основні поняття надійності

Надійністю називають властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність включає в себе наступні властивості: безвідмовність, довговічність, збереженість і ремонтопридатність.

Безвідмовність – властивість виробу безперервно зберігати працездатність протягом заданого часу. Властивість виробу зберігати працездатність до настання граничного стану (відмови) при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту називається *довговічністю*.

Збереженістю називається властивість виробу безперервно зберігати справний і працездатний стан протягом і після зберігання та транспортування. Збереженість характеризується здатністю виробу протистояти негативному впливу умов зберігання і транспортування на його безвідмовність і довговічність. Тривале зберігання і транспортування виробів можуть знизити їх надійність при подальшій роботі в порівнянні з виробами, що не підлягають транспортуванню і зберіганню.

Ремонтопридатністю називається властивість виробу, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмов, пошкоджень і усунення їх наслідків шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування.

3.2. Системи і елементи

У теорії надійності розрізняють надійність системи в цілому і надійність елементів, що входять в цю систему.

Системою називається сукупність спільно діючих об’єктів, що повністю забезпечує виконання певних практичних завдань, при цьому під *об’єктом* розуміють різні взаємодіючі технічні пристрої.

Одночасно з терміном «система» вживають аналогічні за змістом терміни «апаратура» і «пристрій», проте узагальнюючим в електроніці є термін «електронний засіб».

Розрізняють системи відновлювані та невідновлювані. *Відновлювана* система після відмови піддається ремонту і продовжує виконувати свої функції. Більшість використовуваних на практиці систем відносяться до відновлюваних. *Невідновлювальна* система в разі виникнення відмови не підлягає або не піддається відновленню або з економічних міркувань, або з технічних причин.

Системи розрізняють також за характером обслуговування. Системи, що виконують свої завдання за допомогою обслуговуючого персоналу і зазвичай пристосовані до усунення відмов під час експлуатації, відносяться до *обслуговуваних*. Системи, що виконують покладені на них функції без участі обслуговуючого персоналу, називаються *необслуговуваними*. Такі системи можуть бути самовідновлюваними, тобто пристосованими до самостійного усунення відмов без участі обслуговуючого персоналу, наприклад, за рахунок автоматичного резервування.

За характером впливу відмов елементів на вихідний параметр системи підрозділяються на прості і складні. *Прості* системи при відмові елементів або повністю втрачають працездатність, або продовжують виконувати свої функції в повному обсязі, якщо елемент, що відмовив зарезервований. Такі системи можуть перебувати тільки в двох станах: робочому і неробочому. *Складні* системи мають здатність при відмові елементів виконувати свої функції, але з меншою ефективністю, тобто вони можуть перебувати в кількох робочих станах. До складних систем зазвичай відносяться багатоканальні комплекси з розгалуженою структурою, що складаються з кількох самостійних, але взаємопов’язаних пристроїв, наприклад, комп’ютерні мережі.

Також системи можуть бути з *резервуванням* і *без резервування*.

Елементом називається частина системи, яка не має самостійного експлуатаційного призначення і виконує в ній деякі функції. Для практичного використання будь-якого елементу необхідно з’єднання його з іншими елементами в певну систему. Елементами в електронних системах є різні електрорадіовироби, наприклад, резистори, конденсатори, інтегральні схеми, кабелі, реле, а також більш складні конструкції, що входять до складу пристроїв. При аналізі надійності блочних і функціональних систем в якості елементів можуть розглядатися окремі

каскади, вузли, блоки. Елементами складних систем є окремі пристрої і агрегати.

Один і той же пристрій в залежності від розв'язуваної задачі може розглядатися або як система, або як елемент.

3.3. Класифікація відмов

Відмова – це випадкова подія, яка полягає в порушенні працездатності. Відмову іноді називають – «граничний стан». Загальна класифікація відмов технічних виробів наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація відмов технічних виробів

Ознаки	Вид відмови	Характеристика відмови
Характер зміни параметра до моменту виникнення відмови	Раптова	Стрибкоподібна зміна значень одного або декількох параметрів виробу
	Поступова	Поступова зміна значень одного або декількох параметрів виробу
Зв'язок з відмовами інших виробів	Незалежна	Відмова не обумовлена ушкодженнями або відмовами інших виробів
	Залежна	Відмова обумовлена ушкодженнями або відмовами інших виробів
Можливість використання виробу після відмови	Повна (катастрофічна)	Повна втрата працездатності виробу, що виключає його використання за призначенням
	Часткова	Подальше використання виробу можливо, але з меншою ефективністю
Характер появи відмови	Збій	Відмова, яка самоусувається, що призводить до короткочасного порушення працездатності
	Така, що перемежовується	Збій одного і того ж характеру, що виникає багаторазово
	Стійка	Відмова, яка усувається тільки в результаті проведення відновлювальних робіт
Причина виникнення відмови	Конструкційна	Виникає внаслідок порушення встановлених правил і норм конструювання

	Виробнича	Виникає через порушення або недосконаліть технологічного процесу виготовлення або ремонту виробу
	Експлуатаційна	Виникає внаслідок порушення встановлених правил і умов експлуатації виробу

3.4. Показники надійності (імовірнісні моделі показників)

Показник надійності – це кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що складають надійність виробу (ДСТУ 2992-95).

Розрізняють дві групи показників надійності, що відображають відповідно властивості безвідмовності і ремонтопридатності:

– показники безвідмовності (характеризують надійність виробів, що ремонтуються);

– показники ремонтопридатності (характеризують надійність виробів, що не ремонтуються).

3.4.1 Показники безвідмовності

а) Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – це імовірність того, що за час експлуатації t не відбудеться відмови в роботі виробу. Якщо ξ – випадковий час роботи до відмови (напрацювання на відмову), а t – вважати заданою величиною, то:

$$P(t) = P(\xi \geq t).$$

б) Імовірність відмови $Q(t)$:

$$Q(t) = P(\xi < t) = 1 - P(t).$$

в) Щільність імовірності відмов $f(t)$ – це диференційний закон (щільність розподілу) випадкової величини $\xi(t)$:

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

г) Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – це умовна імовірність відмови виробу в момент t за умови, що виріб до цього моменту пропрацював без відмов

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

д) Середнє напрацювання t_0 до відмови – це математичне очікування (середнє значення) напрацювання на відмову:

$$t_0 = M\left[\xi\right]$$

Розмірність показників безвідмовності:

$P(t), Q(t)$ – безрозмірні, $F(t), \lambda(t)$ – (1/год), t_0 – в годинах.

3.4.2 Показники ремонтопридатності

а) Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – це ліміт відношення імовірності відмови за інтервал Δt, що слідує за часом t, до величини цього інтервалу, коли $\Delta t \to 0$:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{Q\left(t, t+\Delta t\right)}{\Delta t}, \text{ 1/год.}$$

б) Середнє напрацювання на відмову T_0 – це математичне очікування випадкових напрацювань ξ між двома послідовними відмовами:

$$T_0 = M\left[\xi\right].$$

Розмірність – в годинах.

в) Середній час відновлення T_B – це математичне сподівання випадкового часу τ, що витрачено на ремонт після чергової відмови:

$$T_B = M\left[\tau\right], \text{ год.}$$

г) Стаціонарний коефіцієнт готовності:

$$K_Г = \frac{T_0}{T_0 + T_B} \text{ (безрозмірна величина).}$$

д) Стаціонарний коефіцієнт простою:

$$K_П = \frac{T_B}{T_0 + T_B} \text{ (безрозмірна величина).}$$

3.5. Оцінка показників безвідмовності за результатами випробувань (статистичні моделі показників)

Вихідні дані для оцінювання можуть бути представлені в одному з двох варіантів.

1) Негруповані дані:

N_0 – загальне число виробів, випробуваних на надійність;

$t_1,...,t_{N_0}$ – набір значень (вибірка) отриманих напрацювань на відмову;

$n(t)$ – число відмов, що спостерігалися за період випробувань від 0 до t, $\left(t \le t_{N_0}\right)$.

2) Груповані дані:

$\Delta t_1,...,\Delta t_m$ – кількість інтервалів часу (груп) за період випробувань від 0 до t_{N_0};

m – число груп $\left(m \square\ N_0\right)$;

$n\left(\Delta t_j\right)$ – число відмов, які спостерігалися в інтервалі з номером j, ($j = \overline{1,m}$);

$\tilde{t}_{j-1}, \tilde{t}_j$ – початок і кінець інтервалу Δt_j;

$\overline{t}_j$ – середина інтервалу Δt_j, $\left(\overline{t}_j = \frac{1}{2}\left(\tilde{t}_{j-1} + \tilde{t}_j\right)\right)$.

Оцінки відповідних показників безвідмовності будемо позначати зірочкою:

а) $P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$;

б) $Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}$;

в) $f^*(t_j) = a(t_j) = \frac{n(\Delta t_j)}{N_0 \cdot \Delta t_j}$,

Оцінку $f^*(t_j)$ позначають іноді, як $a(t)$ і називають «частота відмов».

г) $\lambda^*(t_j) = \frac{n(\Delta t_j)}{\overline{N}_j \cdot \Delta t_j}$,

де: $\overline{N}_j$ – середнє число справно працюючих виробів на початку і в кінці інтервалу Δt_j, $\overline{N}_j = \frac{\left(N_{j-1} - N_j\right)}{2}$, N_{j-1}, N_j – число виробів справно працюючих на початку і в кінці інтервалу Δt_j;

д) $t_0 = \frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N_0} t_i$ (негруповані дані),

$$t_0 = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\left(\tilde{t}_{j-1} + \tilde{t}_j\right)\cdot\frac{n\left(\Delta t_j\right)}{N_0} = \sum_{j=1}^{m}\left(\overline{t}_j\right)\cdot\frac{n\left(\Delta t_j\right)}{N_0}$$ (груповані дані).

3.6. Основний закон надійності

Досвід експлуатації нових радіоелектронних виробів показує, що інтенсивність їх відмов на досить великому інтервалі часу (десятки тисяч годин) є величина постійна:

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

Такий інтервал часу називають періодом нормальної експлуатації. З визначення інтенсивності відмов слідує

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{P(t)dt} = -\frac{d\ln\left[P(t)\right]}{dt}.$$

Проінтегрувавши ліву і праву частини останнього виразу від 0 до *t*, отримаємо

$$-\int_0^t \lambda dt = \ln P(t), \text{ звідки } P(t) = e^{-\lambda t}.$$

Це рівняння називають основним законом надійності для виробів, що не ремонтуються.

Враховуючи, що $f(t) = -\frac{dP(t)}{d(t)}$, отримаємо:

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

Таким чином, за умови постійності інтенсивності відмов маємо показовий закон розподілу часу відмов. Середнє напрацювання в цьому випадку дорівнює

$$t_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

3.7. Структурні моделі надійності

Рішення задачі надійності технічної системи за відомими значеннями показників надійності, що входять в цю систему елементів, залежить від логічної структури з'єднання останніх. Розрізняють дві основні структури: послідовну і паралельну.

3.7.1. Послідовна структура елементів

Така модель називається основною. Вона не має структурної надлишковості. У цьому випадку відмова одного елемента викликає відмову всієї системи. На схемі заміщення елементи зображуються у вигляді послідовного ланцюжка опорів (рис. 3.1):

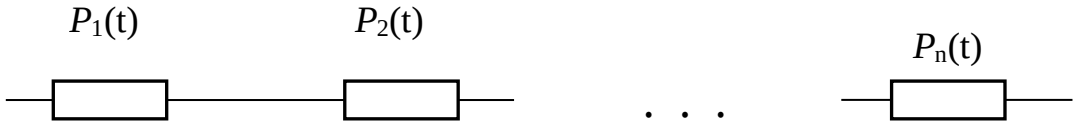


Рисунок 3.1

Відмова елемента задається у вигляді обриву. Порушення працездатності – припинення проходження через систему електричного струму.

Якщо $P_1(t)$, …, $P_n(t)$ – імовірності безвідмовної роботи n елементів системи, то надійність всієї системи

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t).$$

При основному законі надійності маємо

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right)\cdot t} = e^{-\lambda_{\Sigma} t},$$

де

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i .$$

Послідовна структура лежить в основі простого (орієнтовного) методу розрахунку надійності, що включає етапи:

1. Підсумовування інтенсивностей відмов всіх типових елементів (інтенсивності беруть з довідкової літератури):

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i .$$

2. Обчислення середнього напрацювання на відмову:

$$t_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} .$$

3. Визначення закону надійності системи для будь-якого часу t:

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t} .$$

Однак, при простоті розрахунку, послідовна модель характеризується зниженням надійності зі зростанням числа елементів, так як ліміт надійності $P_{\Sigma}(t)$ при $n \to \infty$ дорівнює нулю:

$$\lim_{n \to \infty} \prod_{i=1}^{n} P_i(t) = 0 .$$

Висновок: чим складніше послідовна (основна) система – тим вона ненадійніша.

3.7.2. Паралельна структура елементів

Це система зі структурною надмірністю і логіка впливу відмов елементів на відмову всієї системи наступна: в системі настає відмова, якщо відмовляють всі без винятку елементи системи (рис. 3.2).

Імовірність відмови системи визначається добутком імовірностей відмов всіх її елементів:

$$Q_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^{m} \left[1 - P_i(t)\right].$$

Звідси, імовірність відмови всієї системи:

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - Q_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} \left[1 - P_i(t)\right],$$

де m – число елементів системи.

Паралельна структура є основною для побудови резервованих систем.

Якщо, наприклад, N основних виробів резервується за допомогою M резервних, то відношення $\frac{M}{N} = R$ називають кратністю резервування (рис. 3.3). Для випадку $N = 1$ (резервування з цілою кратністю) маємо:

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - P(t)\right]^{R+1},$$

де $P(t)$ – надійність основного елемента. При цьому вважають, що надійності основної і резервної частин – однакові; $P_c(t)$ – надійність всієї системи з резервуванням.

Слід зазначити, що при паралельній структурі

$$\lim_{m\to\infty} P_{\sum}(t) = \lim_{m\to\infty} \left\{1 - \prod_{i=1}^{m}\left[1 - P_i(t)\right]\right\} = 1.$$

Надійність такої структури зростає зі збільшенням числа резервних елементів.

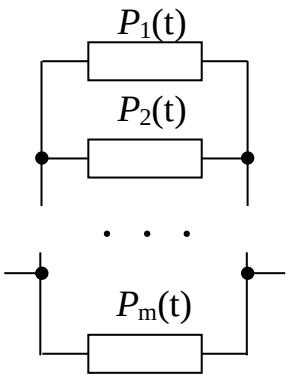


Рисунок 3.2

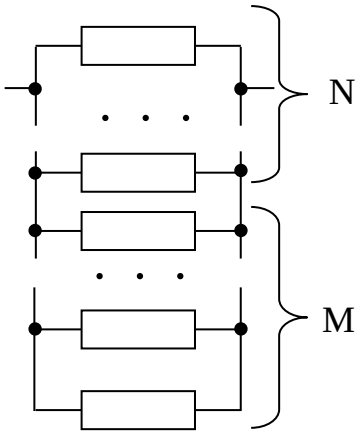


Рисунок 3.3

3.8. Додаткові показники, що характеризують експлуатаційну надійність технічних виробів

Інтенсивність відмови є зручним показником, так як для основного (нормального) періоду експлуатації $\lambda = \text{const}$, а інші показники безвідмовності визначаються по експонентній моделі основного закону надійності. Однак, в технічній документації (ТУ, технічний паспорт) підприємство-виробник може вказувати додаткові показники, що характеризують надійність виробу з урахуванням зносу, старіння, ремонту та вимог безпеки, профілактики і технічного обслуговування. До таких показників відносять такі:

1. Строк служби (t_c) – календарна тривалість експлуатації від її початку до настання граничного стану. Вимірюється в одиницях часу (годинах).

2. Технічний ресурс (t_p) – напрацювання від початку експлуатації до початку граничного стану. Вимірюється в роках.

3. Гарантійний термін ($t_г$) – календарна тривалість експлуатації, що встановлюється за погодженням між виробником і замовником. При появі відмови протягом часу ($t_г$) юридичну відповідальність за відмову несе виробник. Вимірюється в одиницях часу (місяцях або роках).

Примітка: співвідношення між перерахованими показниками – $t_г \le t_p \le t_c$.

4. Гамма-відсотковий ресурс ($t_{p\gamma}$) – напрацювання, протягом якого виріб не досягає граничного стану із заданою ймовірністю γ, вираженою в (%). Наприклад, γ_{p90} – означає інтервал часу, протягом якого працездатність зберігають 90% виробів з партії, випущеної заводом-виробником. Вимірюється в одиницях часу.

Примітка: розрахунок гамма-відсоткового ресурсу ведуть за формулою:

$$t_{p\gamma} = \lambda^{-1}(-\ln\frac{\gamma}{100}).$$

5. Гамма-відсотковий термін служби ($t_{c\gamma}$) – календарна тривалість експлуатації, протягом якої виріб не досягає граничного стану із заданою ймовірністю $\gamma(\%)$. Вимірюється в одиницях часу.

6. Середній термін зберігання ($t_{збер}$) – математичне очікування терміну зберігання (в роках). Для засобів вимірювальної техніки - при перевищенні величини $t_{збер}$ експлуатація можлива тільки після метрологічної повірки.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

4.1. Основні положення

Розрахунок надійності – це процедура визначення значень показників надійності об’єкта за допомогою методів, заснованих на використанні довідкових даних про надійність елементів цього об’єкта, а також даних про надійність об’єктів-аналогів, властивостях матеріалів та іншої інформації, наявної на момент розрахунку.

Надійність об’єкта розраховується на всіх етапах життєвого циклу виробу і відповідних цим етапам фазах робіт.

Основними етапами життєвого циклу електронних засобів є проектування, виробництво та експлуатація (рис. 4.1).

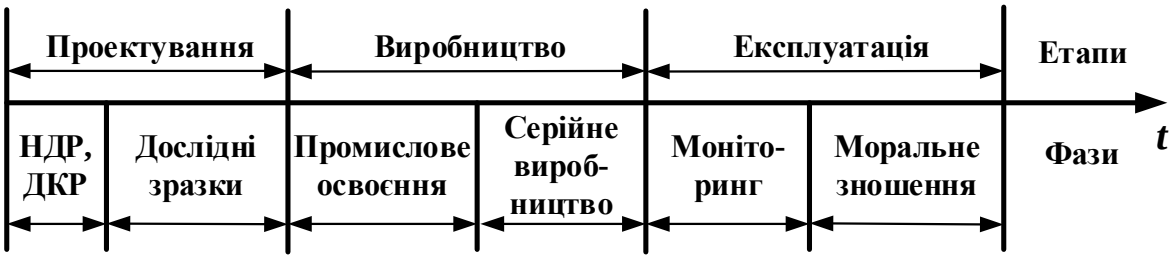


Рисунок 4.1

Проектування (розробка) включає в себе наступні фази: проведення науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДР і ДКР), що завершуються розробкою конструкторської документації, макетуванням і виготовленням дослідних зразків з перевіркою очікуваних характеристик об’єкта, в тому числі і надійності. На останній фазі вносяться необхідні зміни в конструкцію для більш повного задоволення вимог споживача.

Виробництво включає в себе фази передсерійного виробництва (промислового освоєння) і власне серійного виробництва. Перша фаза починається відразу ж після випуску перших дослідних зразків і складається в технологічній підготовці виробництва, підборі обладнання та оснащення для серійного виробництва. Фаза серійного виробництва, що припускає використання всіх засобів виробництва, характеризується випуском великих обсягів продукції.

На етапі *експлуатації* передбачається наявність фази зворотного зв'язку зі споживачем, тобто проведення моніторингу характеристик продукції. При вступі продукції в фазу морального зносу виробнику слід подумати про підготовку для ринку нової продукції.

Розрахунок надійності об'єкта на певних етапах його життєвого циклу включає в себе наступні завдання:

- обґрунтування кількісних вимог по надійності до об'єкта або до його складових частин;
- перевірка реальності встановлених вимог і (або) оцінка імовірності досягнення необхідного рівня надійності об'єкта у встановлені терміни при виділених ресурсах, обґрунтування необхідних коригувань встановлених вимог;
- порівняльний аналіз надійності різних схемно-конструктивних рішень об'єкта і обґрунтування вибору оптимального варіанта;
- визначення досягнутого (очікуваного) рівня надійності об'єкта та (або) його складових частин, у тому числі розрахункове визначення показників надійності або параметрів розподілу характеристик надійності складових частин об'єкта в якості вихідних даних для розрахунку надійності об'єкта в цілому;
- обґрунтування і перевірка ефективності пропонованих (реалізованих) заходів по доопрацюванням конструкції, технології виготовлення і системи технічного обслуговування і ремонту об'єкта, спрямованих на підвищення його надійності;
- рішення різних оптимізаційних задач, в яких показники надійності виступають в ролі цільових функцій, керованих параметрів або граничних умов, в тому числі таких як оптимізація структури об'єкта, розподіл вимог між показниками окремих складових надійності (наприклад, безвідмовності і ремонтопридатності), розрахунок комплектів запасних частин, оптимізація систем технічного обслуговування і ремонту, обґрунтування гарантійних термінів роботи об'єкта і призначених термінів його служби (ресурсу) і ін.;
- перевірка відповідності очікуваного (досягнутого) рівня надійності об'єкта встановленим вимогам (контроль надійності), якщо його пряме експериментальне підтвердження неможливо технічно чи недоцільно економічно.

Розрахунок надійності в загальному випадку являє собою процедуру послідовного поетапного уточнення оцінок показників надійності об’єкта в міру відпрацювання його конструкції, технології виготовлення, алгоритмів функціонування, правил експлуатації, системи технічного обслуговування та ремонту, критеріїв відмов і граничних станів. Наявність більш повної і достовірної інформації про всі фактори, що визначають надійність, обумовлює застосування більш адекватних і точних методів розрахунку і розрахункових моделей.

4.2. Класифікація методів розрахунку

Методи розрахунку надійності підрозділяються за складом розраховуваних показників надійності і основним принципам розрахунку.

По складу розраховуваних показників надійності розрізняють методи розрахунку безвідмовності, ремонтопридатності, довговічності, зберігання і комплексних показників надійності (коефіцієнтів готовності, технічного використання, збереження ефективності та ін.).

За основними принципам розрахунку властивостей, що складають надійність, і комплексних показників надійності об’єктів розрізняють методи прогнозування, структурні і фізичні методи розрахунку.

Методи прогнозування засновані на використанні для оцінки очікуваного рівня надійності даних про досягнуті значення і виявлені тенденції зміни показників надійності об’єктів, аналогічних або близьких до даного об’єкту за призначенням, принципами дії, схемно-конструктивною побудовою, технологією виготовлення, елементною базою, застосовуваними матеріалами, умовами і режимами експлуатації, принципами і методами управління надійністю (далі званими об’єктами-аналогами).

Структурні методи розрахунку надійності засновані на представленні даного об’єкту у вигляді логічної (структурно-функціональної) схеми, яка описує залежність станів і переходів цього об’єкта від станів і переходів його елементів з урахуванням їх взаємодії і виконуваних функцій, з подальшим описом побудованої структурної схеми адекватною математичною моделлю і обчисленням показників надійності об’єкта за відомими характеристиками надійності його елементів.

Фізичні методи розрахунку засновані на застосуванні математичних моделей, що описують фізичні, хімічні та інші процеси, які призводять до відмов об'єкта (досягнення граничного стану), і обчисленні показників його надійності по відомим параметрам навантаженості, характеристикам застосованих речовин і матеріалів з урахуванням особливостей конструкції і технології виготовлення.

Фізичні методи розрахунку використовуються при оцінці надійності інтегральних мікросхем, особливо великих інтегральних схем і мікрозбірок. Специфіка даного підходу до розрахунку полягає в розробці фізико-математичних моделей відмов з метою визначення показників надійності мікросхем. При цьому широко використовуються імовірнісно-статистичні методи оцінки надійності та збір інформації про експлуатацію мікросхем, брак в процесі їх виробництва та ін.

4.3. Методи розрахунку надійності за раптовими відмовами при послідовному з'єднанні елементів

Структурні методи є основними при розрахунку показників безвідмовності, ремонтопридатності і комплексних показників надійності в процесі проектування об'єктів, які можна розділити на елементи з характеристиками надійності, відомими на момент проведення розрахунку або такими, що підлягають визначенню іншими методами (прогнозування, фізичними, за статистичними даними, зібраними в процесі їх застосування в аналогічних умовах). Ці методи застосовуються також для розрахунку довговічності та зберігання об'єктів, критерії граничного стану яких виражаються через параметри довговічності (зберігання) їх елементів.

Розрахунок показників надійності структурними методами в загальному випадку включає в себе:

- представлення об'єкта у вигляді структурної схеми, яка описує логічні співвідношення між станом елементів і об'єкта в цілому з урахуванням структурно-функціональних зв'язків і взаємодії елементів, прийнятої стратегії їх обслуговування, видів і способів резервування та інших факторів;
- опис побудованої структурної схеми надійності об'єкта адекватною математичною моделлю, що дозволяє при прийнятих

припущеннях обчислити показники надійності об’єкта за даними про надійність його елементів в розглянутих умовах застосування.

В якості структурних схем надійності можуть застосовуватися:

- блок-схеми надійності, що представляють об’єкт у вигляді сукупності певним чином з’єднаних (по надійності) елементів;
- ієрархічні дерева, що представляють собою графічне відображення причинно-наслідкових зв’язків, що обумовлюють певні види відмов об’єкта;
- графи (діаграми) станів і переходів, що описують можливі стани об’єкта і переходи з одного стану в інший у вигляді сукупності станів і переходів його елементів.

Математичні моделі, що застосовуються для опису відповідних структурних схем надійності, визначаються видами і складністю цих схем, прийнятими припущеннями щодо законів розподілу характеристик надійності елементів, точністю і достовірністю вихідних даних для розрахунку і іншими факторами.

Перш ніж приступити до розгляду різних методів розрахунку слід сказати, що в якості інженерних додатків цікаві досить прості методи обчислення показників надійності.

Завдання розрахунку показників надійності зводиться до аналізу роботи електрорадіовиробів в стаціонарному режимі при наступних припущеннях (підтверджених на практиці) щодо їх роботи:

- відмови елементів виробу є подіями випадковими і незалежними;
- інтенсивності відмов елементів не залежать від часу, тобто тут має місце експонентний закон розподілу часу напрацювання;
- всі елементи працюють в номінальному (нормальному) режимі, передбаченому технічними умовами, тобто тут має місце стаціонарний режим роботи;
- елементи з’єднані по основній схемі надійності і працюють одночасно.

Залежно від повноти обліку факторів, що впливають на роботу виробу, розрізняють приблизний, орієнтовний і остаточний методи розрахунку надійності.

4.4. Вибір вихідних даних для розрахунку

Розрахунок показників надійності проводиться для засобу вимірювання (приладу) при наступних припущеннях:

а) Прилад є виробом, що не ремонтується.

б) Відмова приладу настає після відмови будь-якого з типових елементів (комплектуючих виробів), з яких цей прилад складається.

в) Інтенсивність відмови будь-якого з елементів є величина постійна.

г) Відмова типового елемента (а, отже, і приладу) є раптовою і катастрофічною.

Як показники надійності використовуються показники безвідмовності виробів, що не ремонтуються:

а) інтенсивність відмови λ,

б) середнє напрацювання до відмови t_0,

в) імовірність безвідмовної роботи $P(t)$.

Розрахунок показників безвідмовності приладу проводиться з урахуванням реальних умов і режимів експлуатації приладу відповідно до вимог ДСТУ 2992-95, ДСТУ 2566-94, РМ 25 446-87, РД50-670-88 введених для підприємств електронної та приладобудівної промисловості.

Розрахункове завдання, в рамках якого проводиться розрахунок надійності, вирішує дві задачі:

1) знайомить студентів з типовою методикою розрахунку показників безвідмовності на етапі проектування приладу;

2) допомагає зрозуміти і усвідомлено використовувати математичні методи теорії надійності в практичній роботі при створенні високонадійних і ефективних технічних пристроїв.

Перше завдання базується на використанні послідовної схеми заміщення приладу при постійних інтенсивностях відмов типових елементів.

Друге завдання використовує паралельну схему заміщення, коли проектований прилад резервується іншими аналогічними приладами з метою підвищення надійності.

Вихідні дані для розрахунку враховують такі конструктивні і експлуатаційні параметри.

4.4.1. Кількість груп елементів в приладі – *L*. Кількість підгруп елементів в j-тій групі – n_j. число елементів і-тої підгрупи в j-тій групі – z_{ij}.

$$N = \sum_{j=1}^{L} \sum_{i=1}^{n_j} z_{ij} \ . \tag{4.1}$$

4.4.2. Число механіко-кінематичних ланок в приладі – *r*.

4.4.3. Температури елементів *j*-тої групи *i*-тої підгрупи $t_{ji}°C$.

4.4.4. Клас точності приладу, тип приладу.

4.4.5. Час експлуатації приладу – *t* (год).

4.4.6. Час перебування приладу у включеному t_1 і вимкненому t_2 станах.

4.4.7. Нормоване значення імовірності безвідмовної роботи (норма надійності) – $P_н(t)$.

4.4.8. Електричні режими роботи типових елементів (струм, напруга, потужність і т.д).

4.4.9. Реальні умови експлуатації приладу.

4.5. Методика розрахунку

4.5.1. Визначають інтенсивність відмов типових елементів кожної підгрупи з *L* груп. Інтенсивність відмов елементів *j*-тої групи і-тої підгрупи знаходять за формулою, 1/год

$$\lambda_{ji} = \frac{\lambda_{0\,ji}}{t}\left(t_1 \cdot F_1 + t_2 \cdot F_2\right) \cdot z_{ji}, \tag{4.2}$$

де $\lambda_{0\,ji}$ – номінальна (довідкова) інтенсивність відмови елементів *j*-тої групи *i*-тої підгрупи при нормальних умовах (температура середовища – 20°С, відносна вологість не більше 80%, атмосферний тиск – $0{,}825 \cdot 10^5$).

Примітка: значення довідкових інтенсивностей відмов беруть з таблиць додатка 1. При відсутності інформації про ці інтенсивності допускається використання експлуатаційних інтенсивностей з таблиць додатка 3. F_1, F_2 – поправкові функції, що враховують режими, умови експлуатації, конструктивні особливості елементів.

Поправкові функції знаходять з табл. Д 1 з урахуванням значень поправкових коефіцієнтів $a_1,\ldots a_{13}$ і $в_1,\ldots в_4$ і станів (включений –

вимкнений) типових елементів. Перелік цих коефіцієнтів з зазначенням чинників, які визначають їх величину, надано в табл. Д 2 і табл. Д 3. Конкретні значення поправкових коефіцієнтів дані в таблицях додатка 2 і визначаються температурою $t_{ji}°C$, коефіцієнтом електричного навантаження K_H типового елемента. Значення коефіцієнта a_4 визначають, користуючись табл. Д 55, як відношення a_4' при КЗ до a_4''' при обриві. Коефіцієнти електричного навантаження розраховують за формулою табл. Д 4 або вибирають, виходячи з рекомендованих значень з табл. Д 5.

4.5.2. Визначають інтенсивність відмов елементів *j*-тої групи $\lambda_j = \sum_{i=1}^{n_j} \lambda_{ij}$, а потім і всього приладу, 1/год

$$\lambda = K \cdot b \sum_{j=1}^{L} \lambda_j , \tag{4.3}$$

де: К – коефіцієнт, що враховує кількість механіко-кінематичних ланок і складність приладу (знаходиться по номограмі додатка 4), *b* – коефіцієнт, що враховує тип і клас точності приладу (береться з табл. Д 6).

4.5.3. Знаходять середнє напрацювання приладу:

$$t_0 = \frac{1}{\lambda} \text{(год)}. \tag{4.4}$$

4.5.4. Визначають безвідмовність приладу за даний час t:

$$P(t_0) = e^{-\lambda t} . \tag{4.5}$$

4.5.5. Розраховують основний закон надійності для значень часу t = 0; 0,25 t_0; 0,5t_0; t_0; 1,5t_0; 2t_0; 3t_0 и 4t_0.

$$P(t) = e^{-\lambda t} \tag{4.6}$$

Для цих же значень часу розраховують функцію відмов:

$$Q(t) = 1 - P(t) \tag{4.7}$$

Результати обчислень заносять в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків *P*(t) та Q(t)

t	0	0,25t_0	0,5t_0	t_0	1,5t_0	2t_0	3t_0	4t_0
P(t)	1							

Q(t)	0							

4.5.6. Перевіряють відповідність розрахованої надійності P(t) нормі $P_н$(t).

Якщо

$$P(t) > P_н(t), \tag{4.8}$$

то роблять висновок про відповідність надійності приладу нормам надійності.

4.5.7. Перевіряють ефективність резервування як методу підвищення надійності.

Вид резервування – загальне, з постійним включенням резерву.

Використовуючи паралельну схему заміщення, знаходять імовірність безвідмовної роботи резервованого приладу

$$P_c(t)=1-(1-e^{-\lambda t})^{R+1}=1-[Q(t)]^{R+1}, \tag{4.9}$$

де R – кратність резервування, λ – розрахована інтенсивність відмов основного приладу.

Враховуючи, що інтегральний закон для часу відмов резервування приладу:

$$F_c(t)=1-P_c(t)=(1-e^{-\lambda t})^{R+1}, \tag{4.10}$$

знаходять щільність розподілу часу відмов:

$$f_c(t)=\frac{\partial F(t)}{\partial t}=\lambda\cdot(R+1)\cdot e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^R. \tag{4.11}$$

Інтенсивність відмов резервованого приладу визначають, використовуючи вирази (4.9), (4.11):

$$\lambda_c(t)=\frac{f(t)}{P_c(t)}=\frac{\lambda(R+1)P(t)[Q(t)]^R}{P_c(t)}. \tag{4.12}$$

Розраховують надійність резервованого приладу за рівнянням (4.9) для значень часу t зазначених в п. 4.5.5. Результати розрахунку заносять в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку імовірності безвідмовної роботи

t	0	$0,25t_0$	$0,5t_0$	t_0	$1,5t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$
$P_c(t)$	1							

Розраховують інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ за рівнянням (4.12) і результати розрахунку заносять в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків інтенсивності відмов

t	0	$0,25t_0$	$0,5t_0$	t_0	$1,5t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$
$\lambda_c(t)$								

Будують попарно графіки *P(t)* і $P_c(t)$, $\lambda(t)$ і $\lambda_c(t)$ (рис. 4.2, рис. 4.3).

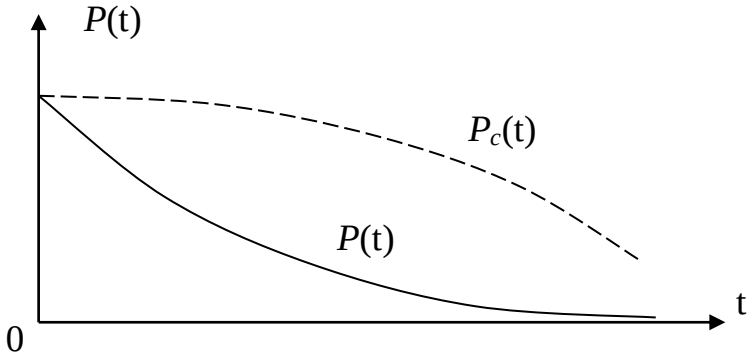


Рисунок 4.2

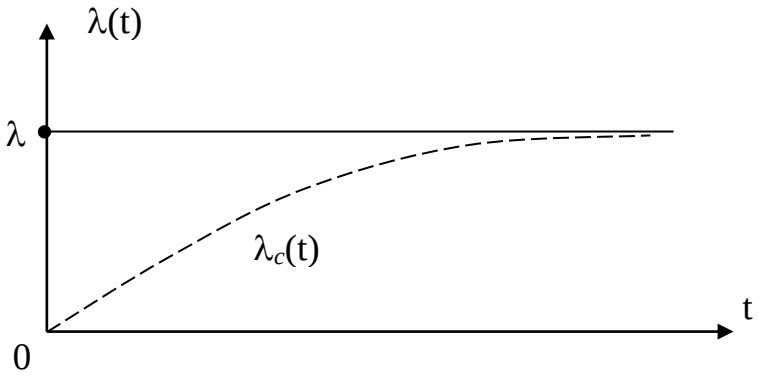


Рисунок 4.3

2.5.8. Основні висновки:

1) надійність приладу відповідає нормі надійності, якщо $P(t) > P_н(t)$, (або не відповідає, якщо $P(t) < P_н(t)$).

2) резервування підвищує надійність приладу, що випливає з рис. 4.2, рис. 4.3 і нерівностей

$$P_c(t) > P(t), \tag{4.13}$$

$$\lambda_c(t) < \lambda. \tag{4.14}$$

2.5.9. Рекомендації щодо підвищення надійності.

Необхідно виділити елементи з максимальною інтенсивністю відмов і дати рекомендації по їх заміні або зміні режимів їх роботи з метою зменшення інтенсивності відмов.

4.6. Порядок оформлення результатів розрахунку

4.6.1. Розрахункове завдання повинно містити наступні розділи:

1) Вихідні дані.

2) Вступ.

3) Розрахунок показників безвідмовності:

а) основного;

б) резервованого приладу.

Висновки.

Розділ «Вихідні дані» повинен включати конкретні значення L, E_j, N, n, $t_{ji}{}^{\circ}C$, t, t_1, t_2, $P_н(t)$, R, відповідно до п. 2.4 (допускається наявність додаткових даних по електричним режимам роботи елементів).

Розділ «Вступ» повинен містити:

- загальні положення (класифікація показників безвідмовності);
- виведення основного закону надійності для періоду нормальної експлуатації.

Розділ «Розрахунок показників безвідмовності» ділиться на дві частини:

а) розрахунок надійності основного приладу:

- розрахунок інтенсивності відмов всього приладу (п. *4.5.2*),
- розрахунок t_0, $P(t)$ і $Q(t)$, відповідно до п.п. *4.5.3 – 4.5.6*.

б) розрахунок надійності резервованого приладу:

- аналіз паралельної схеми заміщення приладу для кратності резервування R,
- класифікація основних схем резервування,

- розрахунок імовірності безвідмовної роботи $P_c(t)$, інтегрального $F_c(t)$ і диференційного (щільності імовірності) $f_c(t)$ законів відповідно до п. *4.5.7*.

Розділ «Висновки» повинен містити:

- висновок про придатність або непридатність приладу за показниками безвідмовності, зокрема, по співвідношенню між $P(t)$ і $P_н(t)$,
- рекомендації щодо підвищення надійності.

4.6.2. Графічна частина складається з 1 плаката, в якому повинні бути представлені: послідовна схема заміщення основного приладу для L груп елементів, рівняння для розрахунку λ, T, $P(t)$ і $Q(t)$, таблиця інтенсивностей відмов по групах, графік функції відмов $Q(t)$, паралельна схема заміщення резервованого приладу, рівняння для розрахунку $P_c(t)$ і $\lambda_c(t)$, графік $P(t)$ і $P_c(t)$, λ і $\lambda_c(t)$.

4.7. Приклад розрахунку надійності

4.7.1. Вихідні дані:

а) прилад – вимірювальний перетворювач, що працює в режимі тривалого включення;

б) клас точності – 0,1;

в) конструктивні характеристики: $r = 1$, $R = 3$;

г) час експлуатації: $t = 5000$ год, $t_1 = 1500$ год;

д) умови експлуатації: авіатранспорт, клімат – холодний, навантаження – не амортизовані, приміщення не опалювальне;

е) норма надійності: $P_н(t) = 0{,}95$.

є) число груп елементів L=5. Перелік підгруп наданий в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Вихідні дані для розрахунку надійності

Група (j)	Під-група (i)	Тип елементів	Кількість z_{jI}	Режими роботи			
				t_{ji} °C	$K_Н$	U(В)	P(Вт)
1 Інтегральні мікросхеми	1	КМ142	4	40	0,3		
	2	КР1021ХА3	1	20	0,3		
2 Конденса-тори	1	К10П-4	6	40		800	
	2	К15-4	2	30	0,1		
3 Резистори	1	СП3-16	2	35			0,5

	2	СП5-2	2	40			0,1
4 Перемикачі	1	ПГ13 (m=6)	1	40			
5 Трансфор-матори	1	ТС14-2-1 (n=3)	1	50			

4.7.2. Розрахунок інтенсивності відмов по групах елементів ведемо з використанням табл. Д 1 – табл. Д 80.

З табл. Д 24, табл. Д 25 визначаємо коефіцієнти, що враховують умови експлуатації, загальні для всіх груп елементів.

$b_1 = 1{,}4$; $b_2 = 1{,}2$ (навантаження не амортизовані, авіатранспорт),

$b_3 = 1{,}3$ (приміщення не опалювальне, пило- і бризкозахищене),

$b_4 = 3$ (транспорт).

Розраховуємо поправковий коефіцієнт a_1, однаковий для всіх груп елементів (табл. Д 2 і табл. Д 3):

$a_1 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 = 1{,}4 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}3 \cdot 3 = 6{,}552$.

1) Розраховуємо інтенсивність відмов для першої групи елементів.

Підгрупа 1. Інтегральна мікросхема КМ142 (корпус пластмасовий, число виводів – 16, схема аналогова, інтегральна).

Номінальна інтенсивність відмов мікросхеми КМ142 (з табл. Д 8 або табл. Д 74) дорівнює:

$\lambda_0 = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ (1/год).

З табл. Д 1 визначаємо перелік поправкових коефіцієнтів, необхідних для розрахунку функції F_1 і F_2 (група інтегральних мікросхем).

Використовуючи табл. Д 2 враховуємо чинники, що впливають на величину поправкових коефіцієнтів для мікросхеми КМ142. Конкретне значення коефіцієнтів беремо з таблиць дод. 2:

$a_2 = 5{,}0$ (табл. Д 27),

$a_3 = 10^{-3}$ (табл. Д 54),

$a_4 = 0{,}20/0{,}80 = 0{,}25$ (визначаємо, як відношення коефіцієнтів для КЗ і обриву, табл. Д 55),

$a_5 = 1{,}1$ (табл. Д 58),

$a_6 = 0{,}28$ (табл. Д 64),

$a_7 = 0{,}5$ (тип випробувань – зовнішній візуальний контроль, табл. Д 66),

$a_8 = 1{,}5$ (табл. Д 67).

Розраховуємо поправкові функції, використовуючи табл. Д 1:

$F_1 = a_1 a_2 a_4 a_6 a_8 = 6{,}552 \cdot 5{,}0 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}28 \cdot 1{,}5 = 3{,}423,$

$F_2 = a_1 a_3 a_5 a_6 a_7 = 6.552 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}28 \cdot 0{,}5 = 1{,}009 \cdot 10^{-3}.$

Інтенсивність відмов елементів підгрупи 1, групи 1 знаходимо, використовуючи формулу (4.2) і з огляду на кількість цих елементів z_{11}:

$$\lambda_{11} = \lambda_0 \cdot \frac{(t_1 F_1 + t_2 F_2)}{t} \cdot z_{11}.$$

Визначаємо час t_2:

$$t_2 = t - t_1 = 5000 - 1500 = 3500 \text{ год.}$$

$$\lambda_{11} = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(1500 \cdot 3{,}423 + 3500 \cdot 1{,}009 \cdot 10^{-3}\right)}{5000} \cdot 4 = 0{,}411 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Підгрупа 2. Мікросхема КР1021ХА3.

Визначаємо коефіцієнт a_2, що враховує температуру T = 20°С (табл. Д 27).

$$a_2 = 1{,}0.$$

Решта коефіцієнтів відповідають мікросхемі підгрупи 1.

Перераховуємо поправочну функцію F_1:

$$F_1 = a_1 a_2 a_4 a_6 a_8 = 6{,}552 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}28 \cdot 1{,}5 = 0{,}685 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

З табл. Д 74 знаходимо номінальну інтенсивність відмов для мікросхеми КР1021ХА3 (мікросхема аналогова інтегральна):

$$\lambda_0 = 1{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Розраховуємо інтенсивність відмов мікросхеми з підгрупи 2 групи 1, враховуючи, що $z_{12} = 1$:

$$\lambda_{12} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(1500 \cdot 0{,}6846 + 3500 \cdot 1{,}009 \cdot 10^{-3}\right)}{5000} = 0{,}206 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Знаходимо інтенсивність відмов елементів першої групи:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = 0{,}411 \cdot 10^{-6} + 0{,}206 \cdot 10^{-6} = 0{,}617 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

2) Розраховуємо інтенсивність відмов для елементів групи 2.

Підгрупа 1. Конденсатор керамічний К10П-4, напругою до 1600 В.

Приймаємо номінальну напругу U_0 = 1600 В.

Коефіцієнт електричного навантаження обчислюємо, використовуючи табл. Д 4:

$$K_н = \frac{U}{U_0} = \frac{800}{1600} = 0{,}5.$$

Обчислюємо коефіцієнти поправкових функцій F_1 і F_2, визначивши перелік коефіцієнтів з табл. Д 1 (рядок – «конденсатори»):

a_2 = 0,43 (табл. Д 40, при T = 40ºС і $K_н$ = 0,5),

$a_3 = 10^{-3}$ (табл. Д 54),

a_4 = 0,30/0,30 = 1,0 (табл. Д 55).

Обчислюємо поправкові функції:

$F_1 = a_1 a_2 a_4 = 6{,}552 \cdot 0{,}43 \cdot 1{,}0 = 2,$

$F_2 = 52 \cdot 10^{-3}$.

З табл. Д 11 знаходимо номінальну інтенсивність відмов для керамічних конденсаторів підгрупи 1:

$$\lambda_0 = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год)}.$$

Обчислюємо інтенсивність відмов елементів підгрупи 1 (z_{21} = 6):

$$\lambda_{21} = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(1500 \cdot 2{,}817 + 3500 \cdot 6{,}552 \cdot 10^{-3}\right)}{5000} \cdot 6 = 0{,}509 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год)}.$$

Підгрупа 2. Конденсатори К15-4 відносяться до типу керамічних високовольтних. З табл. Д 11 визначаємо:

$$\lambda_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-6}.$$

Знаходимо поправкові коефіцієнти і функції F_1 і F_2:

a_2 = 0,15 (табл. Д 40 при $K_н$ = 0,1 і T = 30ºС),

$a_3 = 10^{-3}$ (табл. Д 54),

a_4 = 0,70/0,30 = 2,33 (табл. Д 55),

$F_1 = a_1 a_2 a_4 = 6{,}552 \cdot 0{,}15 \cdot 2{,}33 = 2{,}29,$

$F_2 = 6{,}552 \cdot 10^{-3}$.

Інтенсивність відмов конденсаторів К15-4 дорівнює (z_{22} = 2):

$$\lambda_{22} = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(1500 \cdot 2,29 + 3500 \cdot 6,552 \cdot 10^{-3}\right)}{5000} \cdot 2 = 0,692 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Інтенсивність відмов елементів групи 2 визначимо як:

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} = 0,509 \cdot 10^{-6} + 0,692 \cdot 10^{-6} = 1,201 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

3) Знаходимо інтенсивність відмов елементів групи 3.

Підгрупа 1. Резистори СП3-16. Це змінні недротяні резистори. З табл. Д 10 визначаємо номінальну інтенсивність відмов таких резисторів

$$\lambda_0 = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Коефіцієнт електричного навантаження вибираємо з табл. Д 5 рекомендованих значень для режиму тривалого включення $K_н = 0,5$.

Визначаємо перелік поправкових коефіцієнтів для резисторів, з табл. Д 1. Обчислюємо значення обраних коефіцієнтів і поправкових функцій (коефіцієнт a_{12} для змінних резисторів відсутній):

$$a_2 = \frac{0,45 + 0,60}{2} = 0,525.$$

Примітка. Цей коефіцієнт знаходимо для T = 35ºС, інтерполюючи його значення 0,45 і 0,60 для температур 30ºС і 40ºС при $K_н = 0,5$, табл. Д 38.

$a_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ (табл. Д 54),

$a_4 = \frac{0,1}{1,0} = 0,1$ (табл. Д 55),

$a_{11} = 1$ (табл. Д 71, для резистора плівкового вуглецевого),

$F_1 = a_2 a_4 a_{11} = 6,552 \cdot 0,525 \cdot 0,1 \cdot 1,0 = 0,344$,

$F_2 = a_1 a_3 a_{11} = 6,552 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,013$.

Інтенсивність відмов першої підгрупи елементів ($z_{31} = 2$) дорівнює:

$$\lambda_{31} = 0,02 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(1500 \cdot 0,344 + 3500 \cdot 0,013\right)}{5000} \cdot 2 = 0,0044 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Підгрупа 2. Резистори СП5-2 є змінними дротяними. З табл. Д 10 маємо:

$$\lambda_0 = 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

З табл. Д 5 визначимо $K_н = 0,5$.

Визначаємо поправочні коефіцієнти:

$a_2 = 0{,}68$ (табл. Д 39 при $K_н = 0{,}5$ і $T = 40°\text{C}$),

$a_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ (табл. Д 54),

$a_4 = \dfrac{0{,}01}{1{,}0} = 0{,}01$ (табл. Д 55),

$a_{11} = 1{,}2$ (приймаємо максимальне з значень для дротяних постійних резисторів, так як відсутня інформація для змінних дротяних резисторів, табл. Д 72).

Обчислюємо поправкові функції:

$F_1 = a_1 a_2 a_4 a_{11} = 6{,}552 \cdot 0.525 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}0 = 0{,}344,$

$F_2 = a_1 a_3 a_{11} = 6{,}552 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}2 = 0{,}0157.$

Інтенсивність відмов другої підгрупи елементів ($z_{32} = 2$) дорівнює:

$$\lambda_{32} = 0{,}04 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1500 \cdot 0{,}344 + 3500 \cdot 0{,}0157)}{5000} \cdot 2 = 0{,}009 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

Визначаємо інтенсивність відмов всіх елементів групи 3:

$$\lambda_3 = \lambda_{31} + \lambda_{32} = 0{,}0044 \cdot 10^{-6} + 0{,}009 \cdot 10^{-6} = 0{,}0134 \cdot 10^{-6} \text{(1/год).}$$

4) Четверта група складається з одного елемента – галетного перемикача з числом контактів $m = 6$.

З табл. Д 12 отримаємо:

$$\lambda_0 = 0{,}05 \cdot 10^{-6} \text{(1/год).}$$

Вибираємо з табл. Д 5 рекомендоване значення коефіцієнта електричного навантаження $K_н = 0{,}8$.

З табл. Д 1 (рядок – «з'єднувачі») визначаємо перелік поправкових коефіцієнтів. Це – a_1, a_3 і a_4.

Користуючись табл. Д 2 і дод. 2, знаходимо конкретні значення цих коефіцієнтів, поправкових функцій і інтенсивності відмов.

$a_3 = 10^{-2}$ (табл. Д 54),

$a_4 = \dfrac{0{,}01}{1{,}0} = 0{,}01$ (табл. Д 55),

$F_1 = a_1 a_4 \text{m} = 6{,}552 \cdot 0{,}01 \cdot 6 = 0{,}393,$

$F_2 = a_1 a_3 \text{m} = 6{,}552 \cdot 10^{-2} \cdot 6 = 0{,}393,$

$$\lambda_{31} = 0{,}05 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1500 \cdot 0{,}393 + 3500 \cdot 0{,}393)}{5000} = 0{,}0196 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).}$$

5) П’ята група включає один силовий трансформатор з числом обмоток $n = 3$.

З табл. Д 16 беремо:

$$\lambda_0 = 0{,}3 \cdot 10^{-6}\ (1/\text{год}).$$

З табл. Д 5 отримаємо:

$$K_н = 0{,}8.$$

З табл. Д 1 (рядок – «трансформатори, дроселі») визначаємо перелік коефіцієнтів.

Це – a_1, a_2, a_3 і a_4.

$a_1 = 6{,}552$,

$a_2 = 0{,}87$ (табл. Д 53 для $K_н = 0{,}8$ і $T = 50^{\circ}\text{C}$),

$a_3 = 10^{-2}$ (табл. Д 54),

$a_4 = \dfrac{0{,}80}{0{,}20} = 4$ (табл. Д 55),

$F_1 = a_1\, a_2\, a_4\, n = 6{,}552 \cdot 0{,}87 \cdot 4 \cdot 3 = 68{,}4$,

$F_2 = a_1\, a_3\, n = 6{,}552 \cdot 10^{-2} \cdot 3 = 0{,}196$,

$$\lambda_5 = 0{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1500 \cdot 68{,}4 + 3500 \cdot 0{,}196)}{5000} = 6{,}197 \cdot 10^{-6}\ (1/\text{год}).$$

Зведемо розраховані дані в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку інтенсивності відмов

Номер групи (j)	$\lambda_j \cdot 10^{-6}$(1/год)
1	0,617
2	1,201
3	0,0134
4	0,0196
5	6,197

4.7.3. Знаходимо інтенсивність відмов основного приладу за формулою (4.3). Для цього попередньо визначаємо коефіцієнти K і B.

Коефіцієнт K шукаємо по номограмі дод. 4 для $N \le 100$ і $r = 1$, K =1,1.

Коефіцієнт B визначаємо з табл. Д 6:

$B = 1{,}0$.

$$\lambda = 1{,}1 \cdot 1{,}0 \sum_{j=1}^{5} \lambda_j = 8{,}048 \cdot 10^{-6} \text{ (1/год).} \qquad (4.15)$$

4.7.4. Розраховуємо за формулою (4.4) середній час безвідмовної роботи приладу (середнє напрацювання до відмови):

$$t_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{10^6}{8{,}048} = 124254{,}5 \text{ год.} \qquad (4.16)$$

4.7.5. Обчислюємо імовірність безвідмовної роботи за час t = 5000 год за формулою (4.5):

$$P(t) = e^{-\lambda t_0} = e^{-8{,}048 \cdot 10^{-6} \cdot 5000} = e^{-0{,}04} = 0{,}96.$$

Порівнюючи $P(t)$ = 0,96 з нормою $P_н(t)$ = 0,95 переконуємося, що за показником «Імовірність безвідмовної роботи» прилад відповідає рекомендаціям по надійності.

4.7.6. За формулами (4.6) і (4.7) обчислюємо, відповідно, значення основного закону надійності і функції відмов приладу (t = 124254,5 год).

Табл. 7 (оформляється для значення t табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Розраховані значення основного закону надійності і функції відмов приладу

t_0	0	$0{,}25t_0$	$0{,}5t_0$	t_0	$1{,}5t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$
$P(t)$	1	0,778	0,606	0,367	0,223	0,135	0,05	0,018
Q(t)	0	0,222	0,394	0,633	0,777	0,865	0,95	0,982

4.7.7. Розраховуємо надійність резервованого приладу при R = 3 (один основний прилад і три резервних).

Визначаємо імовірність безвідмовної роботи резервованого приладу за формулою (4.9)

$$P_c(t) = 1 - [Q(t)]^4, \qquad (4.17)$$

де $Q(t)$ – функція відмов основного приладу (береться з табл. 6).

Табл. 8 (оформляється для значень табл. 4.1).

Таблиця 4.7 – Імовірність безвідмовної роботи резервованого приладу

t_0	0	$0{,}25t_0$	$0{,}5t_0$	t_0	$1{,}5t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$
P_c(t)	1	0,997	0,976	0,839	0,636	0,440	0,185	0,07

4.7.8. Визначаємо залежність інтенсивності відмов $\lambda_c(t)$ резервованого приладу від часу за формулою (4.12):

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda \cdot 4 \cdot P(t)\left[Q(t)\right]^3}{P_c(t)}. \qquad (4.18)$$

4.7.9. При розрахунку $\lambda_c(t)$ значення $P(t)$ і $Q(t)$ беремо із табл. 4.6, а значення $P_c(t)$ – із табл. 4.7. Результати розрахунку – в табл. 4.8 (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.8 – Результати розрахунку інтенсивності відмов

t	0	$0{,}25t_0$	$0{,}5t_0$	t_0	$1{,}5t_0$	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$
$\lambda_c(t) \cdot 10^{-6}$ 1/год	0	0,275	1,222	3,572	5,295	6,393	7,459	7,83

4.7.10. Графічно будуємо в одних і тих же координатах основний закон надійності $P(t)$ основного приладу і $P_c(t)$ резервованого приладу (див. рис. 4.4).

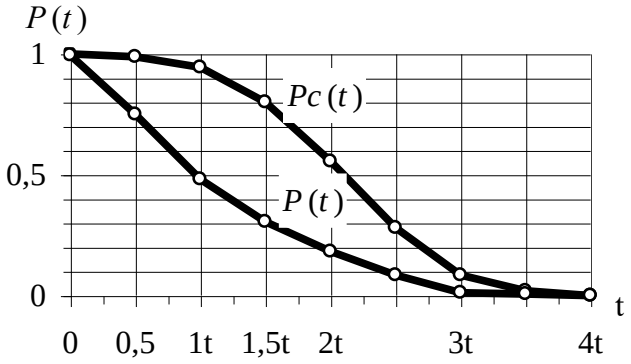


Рисунок 4.4

З графіків видно, що надійність резервованого приладу вище ($P_c(t) > P(t)$) в інтервалі $0 – 4t_0$.

4.7.11. Будуємо залежності λ і λ_c(t) (див. рис. 4.5):

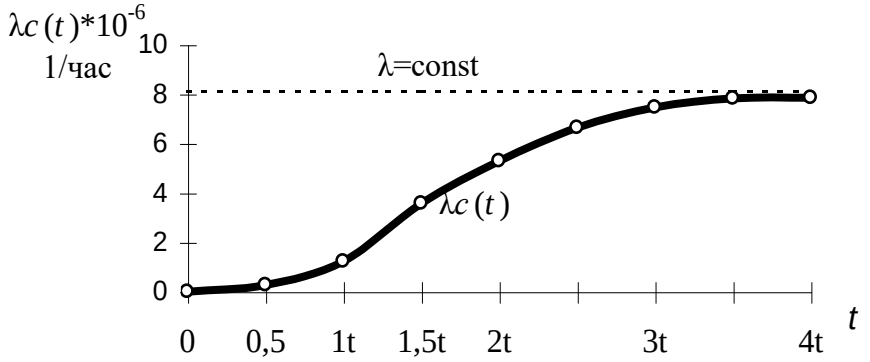


Рисунок 4.5

Інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ резервованого приладу нижче, ніж у нерезервованого, що вказує на більш високу надійність.

4.7.12. Висновки та рекомендації.

1) Надійність приладу відповідає вимогам по надійності, так як $P(t) > P_н(t)$.

2) Найменш надійним елементом, як показує табл. 5, є силовий трансформатор (група 5).

Підвищити надійність трансформатора можна, якщо знизити його температуру (це видно з табл. Д 53 – зменшується коефіцієнт a_2). З іншого боку, як показує табл. Д 4, можна зменшити коефіцієнт електричного навантаження, зменшивши щільність струму у вторинній обмотці. Резервування підвищує надійність приладу, так як імовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$ збільшується, а інтенсивність відмов $\lambda_c(t)$ резервованого приладу зменшується (цей факт наочно ілюструють табл. 4.5-4.7 і графіки рис. 4.4 і рис. 4.5).

РОЗДІЛ 5. ЗАВДАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ

Перед початком розрахунку необхідно вибрати типові елементи приладу. Загальний перелік елементів, розбитих на групи і підгрупи, представлений в табл. 5.1 (крім цього вибір елементів може здійснюватися за вказівкою викладача, на основі таблиць додатка 3).

Таблиця 5.1 – Перелік елементів приладу

Група		Підгрупа		Кількість	Режими		Примітки
№ з/п	Найменування	№ з/п	Тип		t_{ij}°С	$К_Н$	
1	Мікросхеми цифрові інтегральні	1	К176	4	30	0,5	
		2	КР1010КТ1	9	30	0,6	
		3	КР1102	3	20	0,6	
		4	КМ155ТМ5	5	25	0,4	
2	Мікросхеми цифрові інтегральні	1	КР587	2	35	0,7	
		2	К521СА6	2	25	0,7	
		3	КР1006	4	20	0,5	
		4	КР140УД18	6	30	0,8	
3	Мікросхеми аналогові інтегральні	1	К594ПА1	12	40	0,2	
		2	К1121СА1	8	30	0,6	
		3	К1106ХП1	3	35	0,4	
		4	К1401	7	25	0,5	
4	Мікросхеми аналогові інтегральні	1	К1107ПВ3А	7	20	0,8	
		2	КР1118ПА2А	2	35	0,7	
		3	ПВ2А	6	35	0,6	
		4	К1107ПВ2	8	20	0,7	
5	Конденсатори	1	КД-2	2	35	0,7	Керамічний
		2	К31-11	3	40	0,6	Слюдяний
		3	К50-40	1	25	0,6	Електро-літичний
		4	К10П-4	2	30	0,8	Керамічний
6	Резистори	1	С6-4	4	35	0,5	Недротяний
		2	С1-4	3	45	0,5	Змінний недротяний
		3	СПЗ-16	2	30	0,4	
		4	СПЧ-1	2	40	0,3	
7	Перемикачі кнопкові	1	$ПК_Н61$	2	30	–	
		2	$ПК_Н150$	1	30	–	
8	Індикатори напів-провідникові	1	АЛ102АМ	5	35	0,3	
		2	АЛ360А	6	25	0,4	

Вибір груп елементів здійснюється з використанням останньої (x_K) і передостанньої (x_{K-1}) цифр залікової книжки (див. табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Вибір груп елементів

x_K / x_{K-1}	парна	непарна
парна	2, 4, 6, 8	1, 3, 5, 7
непарна	2, 3, 5, 8	1, 4, 6, 7

Установчі параметри вибирають по табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Установчі параметри

Параметр	x_K									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кратність резервування, R	4	2	3	5	2	6	3	4	5	3
Клас точності	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	0,02/0,01			2,5	
Тип приладу	електровимірювальний					цифровий			аналоговий	
Число кінематичних ланок, r	3		5		4		1		3	
Норма надійності $P_н(t)$	0,95		0,90		0,92		0,99		0,98	

Час перебування приладу у включеному (t_1) і вимкненому (t_2) станах обчислюють за формулами:

$$t_1 = (x_K + 1) \cdot 10^4 \text{ (год)};$$

$$t_0 = (x_{K-1} + 1) \cdot 10^4 \text{ (год)}.$$

Умови експлуатації приладу вибирають по табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Умови експлуатації приладу

Умови експлуатації	x_K – парна цифра		x_K – непарна цифра	
	x_{K-1} парна	x_{K-1} непарна	x_{K-1} парна	x_{K-1} непарна
Приміщення	Опалювальне герметичне	Опалювальне негерметичне	Неопалювальне герметичне	Неопалювальне негерметичне
Клімат	Холодний	Помірний степовий	Субтропічний сухий	Помірна середня смуга
Місце експлуатації	Лабораторія	З/д транспорт	Автотранспорт	Металообробний цех
Вібрація	Амортизована	Відсутня (b_1=1)	Неамортизована	Відсутня (b_1=1)
Ударні навантаження	Відсутні (b_2=1)	Амортизовані	Відсутні (b_2=1)	Неамортизовані
Апаратура	Управління технологічним процесом	Транспорт		Управління агрегатами

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Що таке надійність технічного виробу і які її відмінні властивості?
2. Що являють собою показники безвідмовності і ремонтопридатності?
3. Якою властивістю характеризується основний закон надійності?
4. Що називають послідовною структурою в надійності? Як обчислюють надійність такої структури?
5. Яка структурна модель надійності є основою резервування?
6. Як розраховують надійність паралельних структур?
7. За якими ознаками класифікують відмови радіотехнічних пристроїв?

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиці поправкових функцій і коефіцієнтів. Значення інтенсивностей відмов

Таблиця Д 1

Тип елемента	Стан елемента	
	включений	вимкнений
	функція F_1	функція F_2
Інтегральні мікросхеми (ІС)	$a_1\ a_2\ a_4\ a_6\ a_8$	$a_1\ a_3\ a_5\ a_6\ a_7$
Гібридні мікросхеми (ГІС)	$a_1\ a_5\ a_8\ a_9\ a_{10}$	$a_1\ a_3\ a_7\ a_8\ a_{10}$
Оптрони	$a_1\ a_5$	$a_1\ a_3\ a_5$
Елементи пам'яті на ЦМД	$a_1\ a_2\ a_4$	$a_1\ a_3$
Напівпровідникові прилади	$a_1\ a_2\ a_4\ a_5$	$a_1\ a_3\ a_5$
Резистори	$a_1\ a_2\ a_4\ a_{11}\ a_{12}$	$a_1\ a_3\ a_{11}\ a_{12}$
Конденсатори: електровакуумні, газорозрядні, електронні і фотопроменеві прилади	$a_1\ a_2\ a_4$	$a_1\ a_3$
Комутаційні елементи	$a_1\ a_4$ m	$a_1\ a_3$ m
З'єднувачі	$a_1\ a_2\ a_4$ m	$a_1\ a_3$ m
Реле	$a_1\ a_2\ a_4$ (m+n)	$a_1\ a_3$ (m+n)
Трансформатори, дроселі	$a_1\ a_2\ a_4$ n	$a_1\ a_3$ n
П'єзоелектричні прилади	a_1	$a_1\ a_3$
Індикатори	$a_1\ a_2$	$a_1\ a_3$
Електричні машини	$a_1\ a_4$	$a_1\ a_3$

n – число обмоток трансформаторів, дроселів і реле, число комплектуючих виробів в ГІС або оптроні; m – число контактних пар реле, з'єднувача, комутаційного елемента.

Таблиця Д 2

Фактор	Поправковий коефіцієнт	Розрахункові таблиці дод. 2
Умови експлуатації (див. табл.3)	$a_1 = в_1в_2в_3в_4$	24–26
Електричне навантаження і температура	a_2	27–53
Відсутність електричного навантаження (режим зберігання)	a_3	54
Наявність відмов типу коротке замикання (КЗ) і обрив (О)	a_4	55–57
Конструкція корпусу ІС, ГІС, напівпровідникових приладів	a_5	58–61
Ступінь інтеграції ІС	a_6	62–65

Фактор	Поправковий коефіцієнт	Розрахункові таблиці дод. 2
Попереднє відбраковування (контроль)	a_7	66
Функціональне призначення ГІС	a_8	67
Щільність компонування ГІС	a_9	68–69
Кількість елементів в складі ГІС	a_{10}	70
Тип і потужність резистора	a_{11}	71
Номінал резистора	a_{12}	72
Частота комутацій реле	a_{13}	73

Таблиця Д 3

Фактор	Поправковий коефіцієнт	Розрахункова таблиця дод. 2
Вібрації	$в_1$	24
Ударні навантаження	$в_2$	24
Клімат, приміщення	$в_3$	25
Якість обслуговування	$в_4$	26

Таблиця Д 4

Найменування елемента	Розрахункова формула $К_Н$	Прийняті позначення
1 Резистор	$\frac{P}{P_Н}$	P – потужність розсіювання робоча (фактична або розрахункова); $P_Н$ – потужність розсіювання номінальна (за ТУ)
2 Конденсатор	$\frac{U}{U_0}$	U – напруга приведена робоча (сума постійної складової напруги і амплітуди змінної напруги); U_0 – номінальна напруга (за ТУ)
3 Напівпровідниковий діод	$\frac{I_В}{I_0}$	$I_В$ – випрямлений струм середній робочий; I_0 – випрямлений струм номінальний (за ТУ) для розрахункової температури
4 Напівпровідниковий транзистор	$\frac{I_E}{I_{E0}}$	I_E – струм емітера робочий; I_{E0} – струм емітера номінальний (за ТУ)
	$\frac{I_К}{I_{К0}}$	$I_К$ – струм колектора; $I_{К0}$ – струм колектора номінальний (за ТУ)
	$\frac{P}{P_Н}$	P – потужність розсіювання робоча; $P_Н$ – потужність розсіювання номінальна (за ТУ)
	$\frac{P_0}{P_К}$	P_0 – потужність, що розсіюється на колекторі; $P_К$ – потужність, гранично допустима для розрахункової температури, що розсіюється на колекторі
5 Котушка індуктивності дросельна	$\frac{J_К}{J_0}$	$J_К$ – щільність струму в обмотці робоча; J_0 – щільність струму в обмотці номінальна (за ТУ або розрахунком)

Найменування елемента	Розрахункова формула K_H	Прийняті позначення
6 Електронна лампа	$\frac{P}{P_H}$	P – потужність розсіювання на будь-якому з електродів робоча; P_H – потужність розсіювання на будь-якому з електродів номінальна (за ТУ)
7 Електродвигун, генератор, електромагнітна муфта, електромеханічний підсилювач, датчик моментів	$\frac{I_Я}{I_{Я0}}$	$I_Я$ – струм якоря робочий; $I_{Я0}$ – струм якоря номінальний (за ТУ)
	$\frac{U_Я}{U_{Я0}}$	$U_Я$ – напруга якоря робоча; $U_{Я0}$ – напруга якоря номінальна (за ТУ)
	$\frac{U_В}{U_{В0}}$	$U_З$ – напруга збурення робоча; $U_{З0}$ – напруга збурення номінальна (за ТУ)
8 Трансформатор, що обертається, датчик кутів, сельсин	$\frac{U_В}{U_{В0}}$	$U_З$ – напруга збурення робоча; $U_{З0}$ – напруга збурення номінальна (за ТУ)
9 Трансформатор силовий, накальний, анодний, імпульсний	$\frac{U_В}{U_{В0}}$	$U_В$ – вторинна напруга робоча; $U_{В0}$ – вторинна напруга номінальна (за ТУ або розрахунком)
	$\frac{I_Н}{I_{Н0}}$	$I_Н$ – струм навантаження робочий; $I_{Н0}$ – струм навантаження номінальний (за ТУ або розрахунком)
10 Реле і автоматичний перемикаючий пристрій	$\frac{I_К}{I_{К0}}$	$I_К$ – струм через контакт робочий; $I_{К0}$ – струм номінальний (за ТУ)
	$\frac{U}{U_В}$	U – напруга ланцюга, що перемикається; U_0 – напруга ланцюга, що перемикається номінальна (за ТУ)
11 Механічний перемикач, з'єднувальний пристрій, штепсельний роз'єм – вилка, розетка	$\frac{I_К}{I_{К0}}$	$I_К$ – струм через контакт робочий; $I_{К0}$ – струм номінальний (за ТУ)
	$\frac{U}{U_0}$	U – напруга ланцюга, що перемикається; U_0 – напруга ланцюга, що перемикається номінальна (за ТУ)
12 Монтажна плата	$\frac{I_К}{I_{К0}}$	$I_К$ – струм через контакт робочий; $I_{К0}$ – струм номінальний (за ТУ)
13 Панель, клема	$\frac{U_К}{U_{К0}}$	$U_К$ – напруга між сусідніми контактами робоча; $U_{К0}$ – напруга між сусідніми контактами номінальна
14 Мікросхема	$\frac{K_Р}{K_{Р0}}$	$K_Р$ – коефіцієнт розгалуження робочий; $K_{Р0}$ – коефіцієнт розгалуження номінальний (за ТУ)

Таблиця Д 5

Комплектуючі вироби	Визначальний параметр	Коефіцієнт навантаження		
		$K_{H\ MIN}$	$K_{H\ MAX}$ режим	
			коротко-часний	тривалий
Діоди напівпровідникові	Середній випрямний струм	0,1	0,8	0,5
	Зворотна напруга	0,1	0,8	0,5
Транзистори	Струм емітера	0,1	0,8	0,5
	Струм колектора	0,1	0,8	0,5
	Потужність розсіювання на колекторі	0,1	0,6	0,3
	Зворотна напруга на переходах	0,1	0,8	0,5
Інтегральні схеми	Потужність, що розсіюється	–	0,6	0,3
Резистори постійні	Потужність, що розсіюється	0,1	0,7	0,5
Резистори змінні	Квадрат струму	0,1	0,7	0,5
Конденсатори електролітичні оксиднонапівпровідникові	Напруга	0,3	0,7	0,5
Конденсатори інші	Напруга	0,1	0,7	0,3
Електровакуумні прилади	Потужність, що розсіюється	–	–	0,7
	Анодна напруга	–	–	0,8
Силові трансформатори	Щільність струму	0,1	0,9	0,8
Дроселі	Щільність струму	0,1	0,9	0,9
Комутаційні елементи	Струм	–	0,8	–
З’єднувачі	Струм	–	–	0,8
Контактні реле	Струм	–	0,8	–

Таблиця Д 6

Група приладів	Клас точності	*b*
Електровимірювальні (лабораторні та переносні)	0,5	1,5
	0,2	2,0
	0,1	3,0
Цифрові перетворювачі і прилади	–	1,5
Аналогові електронні	–	3,0
Міри зразкові	–	4,0
Магазини R, L C	–	3,0
Трансформатори вимірювальні	–	1,5
Вимірювальні перетворювачі	–	1,0

Таблиця Д 7

Мікросхеми	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Цифрові біполярні	0,10
Цифрові інші	0,30
Аналогові	0,80
Оптопари тріодні	0,10
Оптопари діодні	0,50
Підсилювачі в оптронах	0,08
ЗП на циліндричних магнітних доменах	0,10

Таблиця Д 8

Діоди напівпровідникові	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Випрямні малої потужності германієві	0,03
Випрямні малої потужності кремнієві	0,05
Випрямні середньої потужності кремнієві	0,10
Універсальні кремнієві	0,05
Імпульсні германієві і кремнієві	0,03
Високочастотні кремнієві	0,10
Стовпи малої потужності кремнієві	0,08
Стовпи середньої потужності кремнієві	0,50
Збірки і матриці кремнієві	0,20
Стабілізатори малої потужності кремнієві	0,03
Стабілізатори середньої і великої потужності кремнієві	0,08
Тунельні та обернені германієві і арсенід-галієві	0,10
Перемикальні (тиристори) малої і середньої потужності кремнієві	0,50
Світлодіоди	0,50
Фотодіоди НВЧ змішувальні і помножувальні	0,10
НВЧ параметричні, перемикальні, обмежувальні та генераторні	0,10
Варикапи кремнієві	0,03

Таблиця Д 9

Транзистори	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Малої потужності низької і середньої частоти кремнієві	0,3
Малої потужності високої частоти кремнієві	0,5
Малої потужності НВЧ кремнієві	1,2
Середньої потужності високої частоти кремнієві	0,8
Середньої потужності високої частоти НВЧ кремнієві	0,6
Великої потужності низької і середньої частоти кремнієві	1,0
Великої потужності високої частоти НВЧ кремнієві	1,2
Польові кремнієві	0,3
Транзисторні матриці кремнієві	1,2

Таблиця Д 10

Резистори	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Постійні недротяні плівкові	0,008
Постійні недротяні об’ємні	0,005
Постійні дротяні малогабаритні	0,010
Постійні дротяні регульовані	0,040
Постійні дротяні інші	0,020
Змінні недротяні	0,020
Змінні дротяні	0,040
Терморезистори	0,060
Фоторезистори	0,050
Варистори	0,100

Таблиця Д 11

Конденсатори	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Керамічні дискові і трубчасті	0,04
Керамічні високовольтні	0,50
Керамічні інші	0,10
Склокерамічні	0,04
Скляні, склоемальові	0,10
Слюдяні герметичні	0,10
Слюдяні інші	0,30
Металопаперові	0,05
Паперові	0,10
Плівкові і металоплівкові	0,04
Електролітичні	0,30

Таблиця Д 12

Комутаційні елементи	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Галетні, кулачкові, щіткові перемикачі та вимикачі	0,5
Галетні перемикачі	0,5*
Мікротумблери, мікроперемикачі	0,2*
Тумблери	0,4
Кнопки і кнопочні перемикачі	0,2*

*На одну кнопку, мікротумблер або галету.

Таблиця Д 13

З’єднувачі	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Циліндричні приладові нормальні	0,003
Циліндричні приладові малогабаритні і мініатюрні	0,002
Прямокутні приладові нормальні	0,020
Прямокутні приладові малогабаритні	0,005
Для друкованих плат непрямого контактування	0,005
Для друкованих плат прямого контактування з золотим покриттям	0,005
Для друкованих плат прямого контактування інші	0,020
Контактні пари гнізд електровакуумних приладів; «гніздо-вилка»	0,003

*На одну задіяну контактну пару.

Таблиця Д 14

Контактні пари електромеханічних реле	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Реле з подвійною герметизацією або з магнітокерованими контактами	0,2
Реле герметичні	0,5
Реле залиті смолою або завальцьовані	1,0
Реле зачохлені	1,5

Таблиця Д 15

Обмотки електромеханічних реле	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Обмотки дистанційних перемикачів	0,05
Обмотки інших реле малої і середньої потужності	0,10

Таблиця Д 16

Трансформатори дроселі	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Трансформатори силові	0,30
Трансформатори імпульсні	0,05
Дроселі, котушки індуктивності	0,15

*На одну обмотку.

Таблиця Д 17

Електровакуумні прилади	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Діоди	1,0
Тріоди і подвійні діоди	1,5
Тетроди, пентоди і подвійні тріоди	5,0
Тріод-пентоди і подвійні тетроди	7,0
Кенотрони високовольтні	1,5
Генераторні та модуляторні лампи безперервної дії малої і середньої потужності	14,0
Електрометричні лампи	2,0
Механотрони	3,0
Генераторні лампи безперервної дії великої потужності – тріоди	25,0
Генераторні лампи безперервної дії великої потужності – тетроди	15,0
Імпульсні генераторні лампи великої потужності	25,0
Магнетрони генераторні безперервної дії	40,0
Клістрони підсилювальні імпульсні	140,0
Клістрони підсилювальні безперервної дії	80,0
Клістрони відбивні	40,0
Лампи біжучої хвилі підсилювальні	5,0
Лампи біжучої хвилі фазообертові	3,5
Лампи зворотної хвилі	6,5

Таблиця Д 18

Електронні та фотопроменеві прилади	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Відікони	8,0
Ізокони	25,0
Фотопомножувачі багатокаскадні	0,8
Фотоелементи	8,0
Помножувачі вторинно-електронні	45,0
Моноскопи	18,0
Дисектори	23,0
Кінескопи для чорно-білого телебачення	2,0*
Кінескопи проекційні спеціальні	10,0*
Кінескопи для кольорового телебачення	5,0*
Трубки осцилографічні з магнітним відхиленням променю	5,0*
Трубки осцилографічні з електронним відхиленням променю	8,0*

*З урахуванням параметричних відмов

Таблиця Д 19

Газорозрядні прилади	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Стабілітрони	8,0
Тиратрони релейно-випрямні	20,0
Тиратрони імпульсні	7,0
Тиратрони тліючого розряду	1,0
Розрядники некеровані	0,01 на 1 включення
Розрядники керовані	0,3 на 1 пробій
Лазери газові	80,0

Таблиця Д 20

Індикатори*	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Індикатори тліючого розряду	3,0
Індикатори вакуумні люмінесцентні	4,0
Індикатори рідкокристалічні	8,5
Індикатори напівпровідникові	1,5
Газорозрядні панелі	20,0
Лампи розжарювання сигнальні	0,5
Лампи люмінесцентні	0,15

*****Поправкові коефіцієнти a_1 з таблиць для відповідних класів комплектуючих виробів

Таблиця Д 21

Електричні машини	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Двигуни змінного струму з коротко-замкнутим ротором	1,5
Двигуни змінного струму з фазним ротором	10,0
Двигуни постійного струму з послідовним збудженням і збудженням постійними магнітами	15,0
Двигуни постійного струму з паралельним і змішаним збудженням	20,0

Таблиця Д 22

Інші вироби	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Лінії затримки	0,60
Головки магнітні	1,50
Резонатори кварцові вакуумні	0,20
Фільтри кварцові	1,50
Твердотільні прилади НВЧ*	5,00
Запобіжники	0,10
Тримачі запобіжників	0,05
Індикатори магнітоелектричні	30,00

*Коефіцієнта 2 по таблиці для напівпровідникових приладів

Таблиця Д 23

З’єднання	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$
Пайки	0,001
Зварювання	0,001
Скручування	0,010
Міжз’єднання в ГІС	0,001

$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/год$

Додаток 2
Поправкові коефіцієнти до значень λ_0 електричних та електромеханічних комплектуючих виробів

Значення коефіцієнтів $в_1$ і $в_2$ (вплив вібрації та ударних навантажень) наведено в табл. Д 24.

Таблиця Д 24

Умови експлуатації	$в_1$ (вібрація)		$в_2$ (ударні навантаження)	
	не амортизована	амортизована	не амортизована	амортизована
Приладобудівні підприємства, складальні цехи, лабораторії	1,00	1,00	1,00	1,00
Поле	1,05	1,00	1,00	1,00
Судна	1,30	1,20	1,05	1,00
Металооброблювальні цехи	1,35	1,20	1,10	1,05
Підприємства металургічні, важкого машинобудування (в цехах); авіатранспорт	1,40	1,25	1,20	1,10
Залізничний транспорт	1,50	1,30	1,20	1,15
Автотранспорт	1,60	1,30	1,30	1,20
Апаратура прокатних станів, ковальських молотів, пресів	1,70	1,40	1,60	1,30

Значення коефіцієнтів $в_3$ (вплив клімату) наведено в табл. Д 25.

Таблиця Д 25

Клімат	Кондиціонер	Опалювальне приміщення		Неопалювальне приміщення	
		пило та бризкозахищене	відкрите	пило та бризкозахищене	відкрите
Холодний	1,0	1,0	1,2	1,3	2,0
Помірний, середня полоса	1,0	1,0	1,1	1,1	1,5
Помірний, степний	1,0	1,0	1,3	1,2	1,5
Субтропічний, сухий	1,0	1,0	1,5	1,2	2,0
Субтропічний, вологий	1,0	1,2	1,7	1,5	2,5
Морський, холодний	1,1	1,2	1,7	1,5	3,0

Клімат	Кондиціонер	Опалювальне приміщення		Неопалювальне приміщення	
		пило та бризко-захищене	відкрите	пило та бризко-захищене	відкрите
Морський, жаркий	1,2	1,5	2,2	2,0	3,2

Значення коефіцієнтів $в_4$ (якість обслуговування) наведено в табл. Д 26.

Таблиця Д 26

Призначення апаратури	$в_4$
Побутова	15
Транспорт	3
Керування окремими агрегатами	2
Керування технологічними процесами	1

Значення коефіцієнта a_2 для інтегральних мікросхем наведено в табл. Д 27.

Таблиця Д 27

Т, °С	a_2															
	Технологія ІС															
	ТТЛ, ДТЛ, ЕЗЛ		ТТЛ, ДТЛ, ЕЗЛ		ТТЛ, ДТЛ, ЕЗЛ		И2 Л, МНОП		к МОП к МОП/КПС		к МОП к МОП/КПС		р МОП		Аналогові	
	Корпус															
	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч	Плас	Проч
20	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
40	1,7	1,5	2,0	1,7	2,0	1,8	2,3	1,6	2,3	1,6	3,0	1,8	5,0	2,0	5,0	3,2
60	3,0	1,8	4,0	3,0	5,0	4,0	8,5	3,2	8,5	4,0	15,0	5,0	15,0	4,0	20,0	10,0

Значення коефіцієнта a_2 для ЗП на циліндричних магнітних доменах наведено в табл. Д 28.

Таблиця Д 28

Т,˚С	a_2
20	1
30	1,6
40	2,3
50	5,7

Значення коефіцієнта a_2 для германієвих напівпровідникових приладів наведено в табл. Д 29.

Таблиця Д 29

Т,˚С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,10	0,13	0,15	0,2	0,26	0,35	0,48	0,58	0,77	1,00
30	0,11	0,14	0,18	0,24	0,33	0,41	0,55	0,72	0,95	
35	0,14	0,17	0,25	0,31	0,40	0,52	0,70	0,83		
40	0,16	0,22	0,31	0,40	0,50	0,65	0,87			
45	0,20	0,30	0,38	0,48	0,62	0,80				
50	0,26	0,36	0,48	0,60	0,77					
55	0,35	0,45	0,60	0,75						
60	0,42	0,55	0,72	0,90						
65	0,50	0,70	0,85							
70	0,65	0,85								

Значення коефіцієнта a_2 для кремнієвих напівпровідникових приладів наведено в табл. Д 30.

Таблиця Д 30

Т,˚С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,02	0,03	0,05	0,08	0,13	0,20	0,32	0,47	0,73	1,0
30	0,02	0,04	0,07	0,09	0,16	0,24	0,39	0,57	0,80	
35	0,03	0,05	0,08	0,11	0,18	0,28	0,45	0,67	0,87	
40	0,03	0,06	0,10	0,14	0,22	0,34	0,53	0,77		
45	0,04	0,07	0,11	0,17	0,26	0,40	0,60	0,87		
50	0,05	0,09	0,12	0,20	0,32	0,49	0,74	1,0		
55	0,06	0,11	0,17	0,23	0,37	0,57	0,87			

60	0,08	0,13	0,21	0,30	0,44	0,69	0,93			
65	0,10	0,15	0,25	0,36	0,50	0,80				
70	0,12	0,19	0,27	0,43	0,62	0,90				

Значення коефіцієнта a_2 для арсенідогалієвих напівпровідникових приладів наведено в табл. Д 31.

Таблиця Д 31

T, ˚C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,04	0,05	0,08	0,12	0,18	0,25	0,42	0,60	0,87	1,0
30	0,05	0,06	0,10	0,15	0,22	0,33	0,50	0,73	1,0	
35	0,06	0,08	0,12	0,18	0,25	0,42	0,60	0,87		
40	0,08	0,10	0,15	0,22	0,33	0,50	0,73	1,0		
45	0,09	0,12	0,18	0,25	0,42	0,60	0,87			
50	0,10	0,15	0,22	0,33	0,50	0,73	1,0			
55	0,12	0,18	0,27	0,42	0,60	0,87				
60	0,15	0,22	0,33	0,50	0,73	1,0				
65	0,18	0,27	0,42	0,60	0,87					
70	0,22	0,33	0,50	0,73	1,0					

Значення коефіцієнта a_2 для металодіелектричних резисторів наведено в табл. Д 32.

Таблиця Д 32

T, ˚C	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,40	0,45	0,52	0,58	0,64	0,70	0,77	0,84	0,92	1,0
30	0,40	0,46	0,53	0,60	0,66	0,73	0,81	0,88	0,97	1,05
40	0,41	0,47	0,55	0,64	0,73	0,80	0,88	0,96	1,07	
50	0,43	0,50	0,57	0,67	0,77	0,88	0,99	1,10		
60	0,45	0,55	0,65	0,75	0,86	0,98	1,12			
70	0,52	0,63	0,74	0,88	1,02					

Значення коефіцієнта a_2 для вуглецевих резисторів наведено в табл. Д 33.

Таблиця Д 33

Т, ˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,28	0,39	0,44	0,51	0,60	0,67	0,75	0,82	0,91	1,0
30	0,32	0,42	0,51	0,60	0,68	0,79	0,87	0,96	1,06	
40	0,44	0,56	0,68	0,80	0,92	1,05				
50	0,58	0,75	0,92	1,08						
60	0,77	1,01								
70	1,03									

Значення коефіцієнта a_2 для плівкових композиційних резисторів наведено в табл. Д 34.

Таблиця Д 34

Т, ˚С	a_2					
	$К_Н$					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
20	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0
30	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,20
40	0,86	0,9	1,00	1,10	1,20	1,43
50	0,87	0,98	1,10	1,20	1,40	1,70
60	0,95	1,00	1,20	1,40	1,70	
70	1,00	1,15	1,40	1,60		

Значення коефіцієнта a_2 для об’ємних композиційних резисторів наведено в табл. Д 35.

Таблиця Д 35

Т, ˚С	a_2					
	$К_Н$					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
20	0,70	0,75	0,80	0,90	0,95	1,00
30	0,75	0,80	0,85	0,95	1,00	1,20
40	0,80	0,82	0,90	1,00	1,15	1,30
50	0,85	0,90	0,97	1,10	1,30	1,50
60	0,90	0,95	1,08	1,20	1,50	1,70

70	0,95	1,05	1,20	1,40	1,80	2,10

Значення коефіцієнта a_2 для дротяних постійних резисторів наведено в табл. Д 36.

Таблиця Д 36

Т,˚С	a_2					
	K_H					
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
20	0,10	0,10	0,13	0,30	0,80	1,00
30	0,10	0,10	0,18	0,40	0,90	1,20
40	0,13	0,16	0,25	0,55	1,10	1,30
50	0,18	0,23	0,32	0,70	1,30	1,40
60	0,23	0,30	0,40	0,93	1,60	
70	0,28	0,38	0,50	1,10	1,90	

Значення коефіцієнта a_2 для змінних недротяних резисторів типу СП і СП2 наведено в табл. Д 37.

Таблиця Д 37

Т,˚С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,60	0,61	0,63	0,65	0,68	0,75	0,82	0,88	0,94	1,00
30	0,61	0,62	0,64	0,66	0,69	0,76	0,83	0,89	0,96	1,03
40	0,65	0,66	0,67	0,70	0,75	0,81	0,89	0,96	1,02	1,11
50	0,67	0,68	0,70	0,72	0,77	0,84	0,92	0,99	1,07	1,17
60	0,73	0,74	0,76	0,78	0,83	0,91	1,00	1,09	1,19	1,30
70	0,80	0,81	0,83	0,85	0,91	1,00	1,10	1,20	1,30	1,56

Значення коефіцієнта a_2 для змінних недротяних резисторів типу СП3 наведено в табл. Д 38.

Таблиця Д 38.

Т,˚С	a_2									
	K_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,05	0,12	0,20	0,29	0,40	0,51	0,62	0,74	0,87	1,00
30	0,06	0,13	0,23	0,34	0,45	0,58	0,68	0,86	1,00	1,13
40	0,07	0,18	0,30	0,45	0,60	0,77	0,94	1,13	1,32	1,53

50	0,09	0,23	0,40	0,58	0,76	1,00	1,23	1,47	1,72	1,98
60	0,12	0,30	0,51	0,74	1,00	1,28	1,57	1,88	2,19	2,85
70	0,15	0,37	0,64	0,94	1,26	1,61	1,98	2,37	2,77	3,18

Значення коефіцієнта a_2 для змінних дротяних резисторів наведено в табл. Д 39.

Таблиця Д 39

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,30	0,36	0,44	0,52	0,60	0,68	0,75	0,83	0,91	1,00
30	0,30	0,37	0,45	0,53	0,62	0,70	0,78	0,85	0,93	1,02
40	0,33	0,40	0,51	0,59	0,68	0,70	0,84	0,91	1,00	1,09
50	0,38	0,45	0,57	0,67	0,78	0,88	1,00	1,07	1,19	1,26
60	0,46	0,54	0,67	0,86	1,00	1,14	1,28	1,40	1,54	1,71
70	0,55	0,69	0,86	1,05	1,23	1,45	1,69	1,92	2,14	2,38

Значення коефіцієнта a_2 для керамічних конденсаторів наведено в табл. Д 40.

Таблиця Д 40

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,14	0,17	0,22	0,28	0,35	0,44	0,52	0,66	0,80	1,00
30	0,15	0,18	0,24	0,30	0,37	0,46	0,55	0,70	0,86	1,05
40	0,17	0,22	0,28	0,34	0,43	0,52	0,65	0,80-	1,10	
50	0,20	0,26	0,32	0,40	0,50	0,60	0,75	1,00		
60	0,24	0,30	0,38	0,48	0,60	0,70	0,90	1,20		
70	0,28	0,34	0,45	0,56	0,70	0,80	1,10			

Значення коефіцієнта a_2 для слюдяних конденсаторів наведено в табл. Д 41.

Таблиця Д 41

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,30	0,35	0,40	0,50	0,65	0,70	0,75	0,85	0,90	1,00
30	0,32	0,36	0,45	0,55	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00	
40	0,40	0,45	0,55	0,70	0,85	0,90	1,10			
50	0,50	0,60	0,65	0,90	1,10					
60	0,70	0,80	0,85	1,20						

70	0,95	1,10								

Значення коефіцієнта a_2 для скляних, склокерамічних і склоемалевих конденсаторів наведено в табл. Д 42.

Таблиця Д 42

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,10	0,10	0,12	0,17	0,24	0,32	0,45	0,60	0,80	1,00
30	0,10	0,10	0,14	0,19	0,26	0,38	0,50	0,70	0,90	1,10
40	0,10	0,13	0,18	0,26	0,38	0,50	0,70	0,95	1,20	
50	0,13	0,18	0,26	0,38	0,50	0,70	1,00			
60	0,17	0,24	0,35	0,50	0,70	1,00				
70	0,22	0,32	0,45	0,65	0,95	1,30				

Значення коефіцієнта a_2 для паперових і металопаперових конденсаторів наведено в табл. Д 43.

Таблиця Д 43

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,35	0,51	0,55	0,63	0,68	0,73	0,78	0,83	0,88	1,00
30	0,40	0,52	0,56	0,64	0,70	0,74	0,80	0,85	0,90	1,02
40	0,48	0,54	0,58	0,66	0,74	0,78	0,85	0,90	1,00	
50	0,51	0,56	0,62	0,70	0,80	0,86	0,95	1,00		
60	0,57	0,60	0,75	0,80	0,92	1,00				
70	0,65	0,80	0,90	1,00						

Значення коефіцієнта a_2 для плівкових і металоплівкових конденсаторів наведено в табл. Д 44.

Таблиця Д 44

Т,˚С	a_2									
	$К_Н$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,60	0,70	0,82	1,00
30	0,37	0,41	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61	0,73	0,88	1,10
40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,57	0,67	0,84	1,08	
50	0,44	0,47	0,50	0,53	0,57	0,60	0,78	1,05		
60	0,60	0,63	0,6	0,70	0,75	0,83	0,05			
70	0,95	1,00								

Значення коефіцієнта a_2 для алюмінієвих електролітичних конденсаторів наведено в табл. Д 45.

Таблиця Д 45

Т, ˚С	a_2									
	$К_н$									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	0,54	0,59	0,64	0,70	0,74	0,80	0,81	0,90	0,92	1,00
30	0,55	0,61	0,65	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,96	1,01
40	0,58	0,64	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,96	1,02	1,07
50	0,65	0,71	0,77	0,83	0,89	0,95	1,01	1,06	1,12	1,16
60	0,78	0,86	0,93	1,00	1,07	1,14	1,22	1,29	1,36	1,43
70	1,10	1,22	1,32	1,42	1,52	1,63	1,73	1,83		

Значення коефіцієнта a_2 для оксидно-напівпровідникових конденсаторів наведено в табл. Д 46.

Таблиця Д 46

Т, ˚С	a_2				
	$К_н$				
	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
20	0,70	0,30	0,70	0,80	1,00
30	0,70	0,30	0,70	0,90	1,05
40	0,73	0,30	0,73	0,92	1,05
50	0,75	0,35	0,75	0,95	1,10
60	0,88	0,45	0,88	1,00	1,50
70	1,20	0,75	1,20	1,35	2,40

Значення коефіцієнта a_2 для циліндричних і прямокутних приладових з’єднувачів наведено в табл. Д 47.

Таблиця Д 47

Т, ˚С	a_2					
	$К_н$					
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
20	0,09	0,20	0,28	0,42	0,58	1,00
30	0,12	0,23	0,33	0,47	0,70	1,10
40	0,14	0,26	0,42	0,57	0,85	1,30
50	0,17	0,30	0,47	0,68	1,00	1,50
60	0,23	0,33	0,59	0,80	1,20	1,80
70	0,24	0,40	0,70	0,94	1,50	2,20

Значення коефіцієнта a_2 для з’єднувачів для друкованих плат наведено в табл. Д 48.

Таблиця Д 48

Т,˚С	a_2					
	$К_н$					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
20	0,11	0,21	0,30	0,47	0,66	1,00
30	0,12	0,21	0,30	0,47	0,73	1,20
40	0,14	0,25	0,33	0,54	0,82	1,30
50	0,17	0,26	0,38	0,61	0,90	1,40
60	0,19	0,30	0,42	0,68	1,00	1,50
70	0,21	0,33	0,47	0,73	1,10	1,60

Значення коефіцієнта a_2 для обмоток реле наведено в табл. Д 49.

Таблиця Д 49

Т,˚С	20	30	40	50	60	70
a_2	1,00	1,10	1,20	1,30	1,45	1,60

Значення коефіцієнта a_2 для контактів електромеханічних реле наведено в табл. Д 50.

Таблиця Д 50

Клас реле	Струм, що комутується, мА	Навантаження	Матеріал контакту	a_2
Зачохлені, завальцьовані, залиті смолою	до 10	будь-яке	золото	1,0
			інші	2,0
	від 10 до 100	активне	всі матеріали	0,2
		індуктивне	група платини	0,5
			інші	1,0
	більше 100	активне	група платини	1,0
			інші	3,0
		індуктивне	група платини	3,0
			інші	6,0
Герметичні	до 10	будь-яке	золото	0,5
			інші	1,0
	від 10 до 100	активне	всі матеріали	0,2
		індуктивне	група платини	0,5
			інші	1,0
	більше 100	активне	група платини	1,0
			інші	3,0
		індуктивне	група платини	2,0
			інші	5,0
З подвійною	до 1	будь-яке	всі матеріали	0,2

Клас реле	Струм, що комутується, мА	Навантаження	Матеріал контакту	a_2
герметизацією і з магнітокерованими контактами	від 1 до 50	будь-яке		0,1
	від 50 до 200	активне		0,5
		індуктивне		1,0
	більше 200	активне	група платини	1,0
			інші	2,0
		індуктивне	група платини	2,0
			інші	5,0

Значення коефіцієнта a_2 для електровакуумних, газорозрядних, електронних та фотопроменевих приладів наведено в табл. Д 51.

Таблиця Д 51

Т, ˚С	a_2			
	$K_н$			
	0,4	0,6	0,8	1,0
20		0,85	0,90	1,00
30		0,90	0,95	1,10
40	0,85	0,95	1,05	1,20
50	0,90	1,00	1,15	1,40
60	0,95	1,10	1,30	1,60

Значення коефіцієнтаa_2 для ламп розжарювання наведено в табл. Д 52.

Таблиця Д 52

$K_н$	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
a_2	0,24	0,55	1,00	1,70	2,60

Значення коефіцієнта a_2 для трансформаторів і дроселів наведено в табл. Д 53.

Таблиця Д 53

Т, ˚С	a_2									
	$K_н$									
	0,1	0,2	03	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20 – 40	0,41	0,42	0,42	0,43	0,45	0,49	0,51	0,56	0,77	1,00
50	0,42	0,44	050	0,52	0,60	0,63	0,65	0,87	1,08	1,52
60	0,58	0,74	0,82	0,90	0,92	1,15	1,53	2,00	2,57	3,35
70	1,05	1,25	1,33	1,66	2,03	2,70	3,33	4,31	5,54	7,13
90	1,93	2,31	2,87	3,62	4,41	5,69	6,95	9,08	11,50	14,50

Значення коефіцієнта a_3 наведено в табл. Д 54.

Таблиця Д 54

Комплектуючі вироби	a_3
Інтегральні мікросхеми	10^{-3}
Напівпровідникові прилади, гібридні мікросхеми	$2 \cdot 10^{-3}$
Резистори постійні	10^{-3}
Резистори змінні	$2 \cdot 10^{-3}$
Конденсатори електролітичні	10^{-2}
Конденсатори інші	10^{-3}
Електровакуумні, фотопроменеві і газорозрядні прилади, індикатори	$2 \cdot 10^{-3}$
П'єзоелектричні прилади	10^{-2}
Трансформатори, дроселі, обмотки реле, з'єднувачі, електричні машини	10^{-2}
Комутаційні вироби, контакти реле	10^{-2}

Значення коефіцієнта $a_4 = a_4^*$ (КЗ) / a_4^* (0) наведено в табл. Д 55.

Таблиця Д 55

Комплектуючі вироби	Вид відмови	a_4		
		Коефіцієнт навантаження		
		менше 0,3	від 0,3 до 0,8	більше 0,8
Інтегральні мікросхеми	КЗ	0,20	0,20	0,20
	0	0,80	0,80	0,80
Діоди напівпровідникові	КЗ	0,20	0,30	0,40
	0	0,80	0,70	0,60
Транзистори	КЗ	0,50	0,40	0,30
	0	0,50	0,60	0,70
Оптопари	КЗ	–	0,30	0,30
	0	–	0,70	0,70
Резистори постійні	КЗ	0,10	0,10	0,10
	0	1,00	1,00	1,00
Резистори змінні	КЗ	0,10	0,10	0,10
	0	1,00	1,00	0,90
Конденсатори електролітичні	КЗ	–	0,05	0,10
	0	–	0,95	1,00
Конденсатори металоплівкові і металопаперові	КЗ	0,10	0,10	0,05
	0	1,00	1,00	0,95
Конденсатори інші	КЗ	0,30	0,30	0,30
	0	0,70	0,30	0,30
Електровакуумні і фотопроменеві прилади	КЗ	0,25	0,25	0,25
	0	0,75	0,75	0,75
Газорозрядні прилади	КЗ	–	–	0,40
	0	–	–	0,60

Комплектуючі вироби	Вид відмови	a_4		
		Коефіцієнт навантаження		
		менше 0,3	від 0,3 до 0,8	більше 0,8
Лампи розжарювання	КЗ	–	–	0,10
	0	–	–	1,00
Трансформатори силові	КЗ	–	–	0,20
	0	–	–	0,80
Трансформатори імпульсні і ЗП на ЦМД	КЗ	–	–	0,50
	0	–	–	0,50
Дроселі, обмотки реле	КЗ	0,40	0,30	0,20
	0	0,60	0,70	0,80
З'єднувачі	КЗ	0,10	0,10	0,05
	0	1,00	1,00	0,95
Комутаційні елементи	КЗ	0,10	0,10	0,05
	0	1,00	1,00	0,95

Значення коефіцієнта a_4 для електричних машин наведено в табл. Д 56.

Таблиця Д 56

Комплектуючі вироби	Вид відмови	a_4
Колекторні електричні машини	КЗ обмоток	0,50
	Обрив обмоток	0,10
	Обрив колекторного ланцюга	0,35
	Руйнування підшипників	0,05
Безколекторні електричні машини	КЗ обмоток	0,30
	Обрив обмоток	0,60
	Руйнування підшипників	0,10

Значення коефіцієнта a_4 для контактів реле наведено в табл. Д 57.

Таблиця Д 57

Контакти реле	Вид від-мови	a_4						
		Струм у ланцюзі контактів, А						
		до 0,05	від 0,05 до 0,1	від 0,1 до 0,2	від 0,2 до 0,4	від 0,4 до 0,6	від 0,6 до 1,0	від 1,00 до 2,00
Магніто-керовані контакти	КЗ	1,00						
	0	0,01						
Контакти реле з подвійною герметизацією	КЗ	0,9						
	0	0,1						
Контакти інших реле	КЗ	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
	0	0,9	0,8	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1

Значення коефіцієнта a_5 для інтегральних мікросхем наведено в табл. Д 58.

Таблиця Д 58

Число виводів	a_5				
	Корпус				
	Пласт-масовий	Керамічний	Метало-керамічний	Метало-скляний плоский	Метало-скляний круглий
4					0,25
8	0,60				0,35
10	0,75				0,40
12	0,85				0,50
14	1,00	0,60	0,50		
16	1,10	0,70	0,60	0,50	
18	1,30				
22	1,60				
24	1,80	1,20	0,80	1,00	
28	2,00				
40	3,20				
42	3,80	2,20			
48		2,60			

Значення коефіцієнта a_5 для гібридних інтегральних мікросхем наведено в табл. Д 59.

Таблиця Д 59

Число виводів	a_5	
	Корпус	
	Пластмасовий	Металоскляний
12	0,85	0,30
14	1,00	0,40
16	1,10	0,50
18	1,30	0,70
22	1,60	0,90
24	1,80	1,00
28	2,00	1,30
40	3,20	2,00
42	3,80	2,30
48	5,00	2,80
64	8,40	4,00

Значення коефіцієнта a_5 для оптронів наведено в табл. Д 60.

Таблиця Д 60

Конструкція корпусу	a_5
Корпус пластмасовий; 14 виводів	1,00
Корпус металоскляний; 8 виводів	0,35
Корпус металокерамічний; 14 виводів	0,50

Значення коефіцієнта a_5 для напівпровідникових приладів наведено в табл. Д 61.

Таблиця Д 61

Корпус	a_5
Пластмасовий	1,00
Металоскляний	0,50

Значення коефіцієнта a_6 для біполярних інтегральних схем наведено в табл. Д 62.

Таблиця Д 62

Число компонентів	a_6	Число компонентів	a_6
2	0,25	500	2,50
5	0,30	700	3,00
10	0,40	1000	3,50
20	0,50	1250	3,70
25	0,55	1600	4,00
35	0,65	2000	4,50
50	0,75	2500	5,00
75	0,90	3500	6,00
100	1,00	5000	7,20
125	125	6000	7,60
150	1,30	7500	9,00
175	1,45	9000	9,50
200	1,50	10000	10,00
225	1,60	12500	11,20
250	1,70	15000	12,00
375	2,20	17500	13,20

Значення коефіцієнта a_6 для МОП інтегральних схем наведено в табл. Д 63.

Таблиця Д 63

Число компонентів	a_6	Число компонентів	a_6	Число компонентів	a_6
3	0,60	175	0,90	3500	1,60

7	0,62	350	1,00	7000	2,00
15	0,65	700	1,20	10500	2,40
25	0,70	1050	1,30	14000	2,60
35	0,75	1400	1,40	17500	2,80
70	0,80	1750	1,45	21000	2,90
130	0,85	2100	1,53	24500	3,10

Значення коефіцієнта a_6 для аналогових інтегральних схем наведено в табл. Д 64.

Таблиця Д 64

Число компо-нентів	a_6		Число компо-нентів	a_6	
	Корпус пластмасовий	Інші корпуси		Корпус пластмасовий	Інші корпуси
4	0,10	0,10	84	1,00	0,90
8	0,15	0,15	92	1,05	0,95
12	0,22	0,20	100	1,15	1,00
16	0,28	0,25	116	1,30	1,20
20	0,32	0,30	132	1,40	1,30
24	0,40	0,35	148	1,55	1,40
28	0,42	0,40	164	1,70	1,55
32	0,45	0,43	180	1,80	1,65
36	0,52	0,50	196	1,90	1,75
40	0,55	0,53	220	2,00	1,90
44	0,60	0,55	236	2,20	2,00
52	0,68	0,60	252	2,35	2,20
60	0,75	0,70	268	2,45	2,30
68	0,85	0,80	284	2,60	2,40
76	0,92	0,85	300	2,70	2,50

Значення коефіцієнтаa_6 для запам'ятовуючих пристроїв в інтегральному виконанні наведено в табл. Д 65.

Таблиця Д 65

Число біт	a_6					
	Біполярні ОЗП	МОП і ПЗЗ ОЗП	Біполярні ПЗП	МОП ПЗП	Біполярні ППЗП	МОП ППЗП
16	0,50	0,90	0,55	0,85	0,55	0,85
32	0,75	1,00	0,65	0,90	0,60	0,90
64	1,00	1,10	0,80	1,00	0,80	1,00
128	1,60	1,40	1,00	1,15	1,00	1,15
256	2,45	1,60	1,20	1,20	1,20	1,20
320	2,80	1,80	1,30	1,40	1,30	1,40
512	3,60	2,00	1,50	1,60	1,55	1,60
576	4,00	3,00	1,90	2,00	2,00	2,00

Число біт	a_6					
	Біполярні ОЗП	МОП і ПЗЗ ОЗП	Біполярні ПЗП	МОП ПЗП	Біполярні ППЗП	МОП ППЗП
1024	5,50	4,00	2,40	2,40	2,65	2,50
2048	8,00	4,50	2,55	2,50	3,00	2,80
2560	9,00	6,00	3,00	3,00	4,00	3,50
4096	11,50	8,50	4,00	3,70	6,60	5,40
8196	18,00	9,00	4,50	4,00	8,00	5,70
9216	20,00	12,00	5,00	4,70	12,30	9,50
18384	26,00	15,00	6,50	6,00	25,50	15,40
65536	–	28,00	8,50	8,00	58,00	42,50

Значення коефіцієнта a_7 для інтегральних схем наведено в табл. Д 66.

Таблиця Д 66

Вид випробувань	Тривалість випробувань		
	1	2	3
Термообробка для стабілізації параметрів	24[**/]	24[**/]	24[**/]
Термоудар [*/]	15 цикл	15 цикл або 10 цикл	15 цикл або 10 цикл
Термоциклювання [*/]	10 цикл		
Механічний удар [*/]	20 000g		
Лінійні прискорення [*/]	30 000g	30 000g	30 000g
Контроль герметичності [*/]	+	+	+
Вплив критичних електричних параметрів	+	–	–
Електротермотренування	168[**/] +72г[***/]	168	–
Заключний контроль електричних параметрів	+	+	+
Рентгенівський контроль	+	–	–
Зовнішній візуальний контроль	+	+	+
Коефіцієнт a_7	0,05	0,1	0,5

[*/] Випробування за ГОСТ 20.57.406-81

[**/] при 125 ˚С

[***/] при 150 ˚С

Значення коефіцієнта a_8 для гібридних інтегральних схем наведено в табл. Д 67.

Таблиця Д 67

Функціональне значення ГІС	a_8
Цифрові ГІС	1,0

Аналогові та цифрові ГІС	1,5

Значення коефіцієнта a_9 для гібридних інтегральних схем наведено в табл. Д 68.

Таблиця Д 68

Число міжз'єднань на 1 см^2 площі підложки *N	a_9	Число міжз'єднань на 1 см^2 площі підложки *N	a_9
2	0,75	25	2,20
5	1,00	30	2,30
10	1,40	35	2,50
15	1,70	40	2,70
20	2,00	45	2,80

Значення N для компонент гібридних інтегральних схем наведено в табл. Д 69.

Таблиця Д 69

Компонент ГІС	Число міжз'єднань N
Контактна площадка ІС	1
Транзистор	3
Діод	2
Конденсатор	2
Резистор	2
Зовнішній вивід	1

Значення коефіцієнтаa_{10} наведено в табл. Д 70.

Таблиця Д 70

Компонент ГІС	Кількість	a_{10}
Транзистори, діоди, конденсатори	1	1,0
Навісні резистори	2	1,7
	4	2,7
	6	3,4
	8	4,2
	10	5,0
	12	5,5
	14	6,0
	16	6,5
	18	7,0

	20	7,6

Значення коефіцієнта a_{11} для недротяних резисторів наведено в табл. Д 71.

Таблиця Д 71

Резистори	a_{11}				
	Потужність розсіювання, Вт				
	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0 і більше
Плівкові вуглецеві	0,3	0,7	1,0	1,5	2,5
Плівкові інші	0,5	0,7	1,0	1,0	1,2
Об'ємні	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1

Значення коефіцієнта a_{12} для постійних резисторів наведено в табл. Д 72.

Таблиця Д 72

Резистори	a_{12}						
	Номінал, Ом						
	до 10^3	від 10^3 до 10^4	від 10^4 до 10^5	від 10^5 до 10^6	від 10^6 до 10^7	від 10^7 до 10^8	Більше 10^8
Плівкові	0,7	1,0	1,5	2,0	1,5	1,1	1,0
Об'ємні	1,0						
Дротяні	0,9	1,0	1,2				

Значення коефіцієнта a_{13} для електромагнітних реле наведено в табл. Д 73.

Таблиця Д 73

Струм, що комутується, мА		a_{13}					
		до 10		від 10 до 100		від 100 до 200	
Тип реле		2-я герметизи с М.К.	Інші	2-я герметизи с М.К.	Інші	2-я герметизи с М.К.	Інші
Частота комутацій, ком/хв	менше 1	1,0	1,0	0,5	1,0	0,8	1,0
	від 1 до 10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	від 10 до 100	1,0	1,5	1,0	1,5	1,2	2,0
	більше 100	1,2	2,0	2,0	3,0	3,0	5,0

Додаток З
Значення інтенсивностей відмов типових елементів за обмеженим числом випробувань

Інтегральні мікросхеми наведено в табл. Д 74.

Таблиця Д 74

Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$	Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
Мікросхеми цифрові інтегральні I – III ступенів інтеграції			
1. КР1010КТ1	0,73	15. К555ЛА9	0,56
2. КР1102 (крім КР1102АП15)	0,59	16. К555ЛН2	0,08
3. К155	0,24	17. КМ555 (крім КМ555ЛА3, КМ555ЛП5)	0,31
4. КМ155 (крім КМ155ЛН1, КМ155ТМ2, КМ155ТМ5)	0,12	18. КМ555ЛА3	0,55
		19. КМ555ЛП5	0,35
5. КМ155ЛН1	0,48	20. КР559	0,13
6. КМ155ТМ2	0,17	21. К561 (крім К561ЛА9, К561ЛЕ5, К561ЛЕ6, К561ТМ3)	0,68
7. КМ155ТМ5	0,54		
8. К176	0,21		
9. К1800	0,62	22. К561ЛЕ6	0,52
10. КМ1804, КР1804, КС1804	0,77	23. К561ТМ3	0,64
11. К500 (крім К500ТМ131)	0,25	24. КР571	0,68
12. К511	0,03	25. К589 (крім К589АП16)	0,17
13. КР531	0,18		
14. К555 (крім К555ЛА9, К555ЛН2, К555ЛЕ1, К555АГ4)	0,10	26. К589АП16	0,30
Мікросхеми цифрові інтегральні IV – VI ступенів інтеграції			
27. КМ1804, КР1804, КС1804	0,77	43. КР580 (крім КР580ВВ55А, КР580ВК28, КР580ВМ80А, КР580ВН59)	0,53
28. КР556	0,24		
29. К565	0,35		
30. КР565	0,25		
31. К573 (крім К573РФ5)	0,30		
32. КР1005 (крім КР1005УН1А, Б)	0,10	44. КР587	0,70
		45. КР588	0,36
33. КР1006	0,40	46. К174КП1	0,10
34. КС1025КП1	0,58	47. К174ПС1	0,24

Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$	Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
35. КМ1118ПА1	0,46	48. К174ХА02	0,14
36. К140 (крім К140УД22)	0,14	49. К174ХА14	0,17
37. К140УД22	0,25	50. К174УН10А, Б	0,23
38. КР140 (крім КР140УД18)	0,10	51. К174УН13	0,10
		52. К521СА6	0,35
39. КР140УД18	0,34	53. К553УД1А, В	0,29
40. КР1408УД1	0,34	54. К553УД2	0,34
41. К142	0,40	55. К554СА1	0,29
42. К157	0,90	56. К554СА2	0,39
Мікросхеми цифрові інтегральні IV – VI ступенів інтеграції			
57. К174 (крім К174КП1, К174ПС1, К174ХА02, К174ХА10, К174ХА14, К174УН10А, Б, К174УН13)	0,20	59. К554СА3А, Б	0,17
		60. К572ПА2А, Б, В	0,57
		61. КМ597СА1	0,29
		62. КМ597СА2	0,35
		63. К740-1	0,35
58. К224СА3	0,49	64. К284	0,90
Мікросхеми цифрові інтегральні I – III ступенів інтеграції			
65. К1102АП15	0,90	70. К555ЛЕ1, К555АГ4	0,90
66. КР134 (крім КР134ИП2)	0,50	71. К561ЛА9, К561ЛЕ5	1,00
67. КР134ИП2	1,00	72. КР580 (крім КР580ВА86)	1,00
68. К500ТМ131	1,00		
69. К523	0,50	73. КР580ВА86	0,02
Мікросхеми цифрові інтегральні IV – VI ступенів інтеграції			
74. КБ1004ХЛ13-4, КБ1004ХЛ14-4	0,70	94. КМ1818, КР1818ВГ93	0,50
75. КР1015ХК2А, Б, КР1015ХК3А, Б	0,30	95. КР1820ВЕ2	0,70
		96. КМ1823ВВ1, КМ1823ВУ1	0,50
76. КР1016БР1	0,70		
77. КМ132РУ5А, КМ132РУ8А, Б, КМ132РУ9А, Б	0,87	97. К1827ВЕ1, ВЕ2	1,00
		98. КР185РУ5	0,50
		99. К500	1,00
		100. К537РУ4А, Б	0,87
78. КР132РУ6А, Б	0,87	101. КИ537РУ1А	0,30
79. К1500РУ470А	0,87	102. КР537	1,00
80. КР1506ХЛ1, КР1506ХЛ2	0,90	103. КР541РУ2, 2А	0,87
81. К1518ВЖ1	0,70	104. К555РЕ4	0,70
82. К1520ХМ1	0,30	105. КР558РР2А, Б	0,70
83. КБ1523ХП1-4	0,70	106. КМ558РР3	1,00
84. К1524ИР1	0,70	107. КР568РЕ1, РЕ2, РЕ3	0,70
85. КР1601РР1, Р1601РР3	0,70		
86. КА1603РЕ1	0,70		

Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$	Серія	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
87. К1801РЕ1А, Б, КР1801РЕ2А, Б	0,70	108. К573РФ5	1,00
		109. КС573РФ2	0,70
88. КМ1801ВМ2А, Б, КМ1801ВМ3	0,70	110. КР580ВВ55А, ВМ80А, ВН59	0,03
89. КМ1802, КР1802	0,30	111. КР580ВК28	0,03
90. К1809ВГ3, К1809РЕ1	0,70	112. КР581РУ1, 1А, РУ2, 2А, РУ3, 3А	0,87
91. К1809РУ1	0,87		
92. КР1810ВМ86	0,70	113. К589	0,30
93. КМ1816ВЕ48	0,70	114. К596РЕ1	0,70
Мікросхеми аналогові інтегральні I – III ступенів інтеграції			
115. КР1005УН1А, Б	0,50	122. К1121СА1	0,9
116. КМ1005УР1А, Б	0,30	123. К1401	1,00
117. К1009ЕН1А, Б, В	0,50	124. КБ1401УД1-4	1,00
118. КР1012ГП1, 2	1,00	125. КР142	1,00
119. КР1021ХА3	1,00	126. К174ХА10	0,30
120. КР1027ХА1	1,00	127. К554СА4	0,90
121. К1106ХП1, 2	0,50	128. К594ПА1	1,00
Мікросхеми аналогові інтегральні I – III ступенів інтеграції			
129. К1108ПА1А, Б	1,00	131. КМ597СА3	1,00
130. К1113ПВ1А, Б, В	0,90	132. К733КН1-2	1,00
Мікросхеми аналогові інтегральні IV – V ступенів інтеграції			
133. КР1021ХА4	0,77	138. КР1118ПА2А, Б	0,77
134. К1107ПВ2	1,00	139. КА528БР2	0,77
135. К1107ПВ3А, Б	0,77	140. КР572ПВ1А, Б, В, ПВ2А, Б, В, КР572ПВ5	0,77
136. КР1107ПВ1	0,77		
137. К1108ПВ1А, Б	1,00		
Мікросхеми гібридні інтегральні IV ступеня інтеграції			
141. К427	1,00		

Характеристика надійності окремих груп інтегральних мікросхем наводиться в табл. Д 75, напівпровідникових діодів – в табл. Д 76, напівпровідникових транзисторів – в табл. Д 77, резисторів – в табл. Д 78, конденсаторів – в табл. Д 79, з'єднувачів – в табл. Д 80.

Таблиця Д 75

Група інтегральних мікросхем	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
142. Мікросхеми інтегральні напівпровідникові аналогові	0,22
143. Мікросхеми інтегральні напівпровідникові цифрові	0,21
144. Мікросхеми інтегральні гібридні	0,42

Таблиця Д 76

Діоди напівпровідникові	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
145. Випрямні	0,020
146. Імпульсні	0,002
147. Діодні матриці	0,010
148. Світловипромінюючі	0,035
149. Стабілітрони	0,001
150. Тиристори	0,300

Таблиця Д 77

Транзистори напівпровідникові	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
151. Малої потужності низької частоти	0,02
152. Малої потужності середньої частоти	0,05
153. Малої потужності високої і надвисокої частот	0,05
154. Середньої потужності високої і надвисокої частот	0,25
155. Великої потужності середньої частоти	0,25
156. Великої потужності високої частоти	0,40

Таблиця Д 78

Резистори	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
157. Постійні дротяні і недротяні	0,01
158. Змінні дротові і недротяні	0,02

Таблиця Д 79

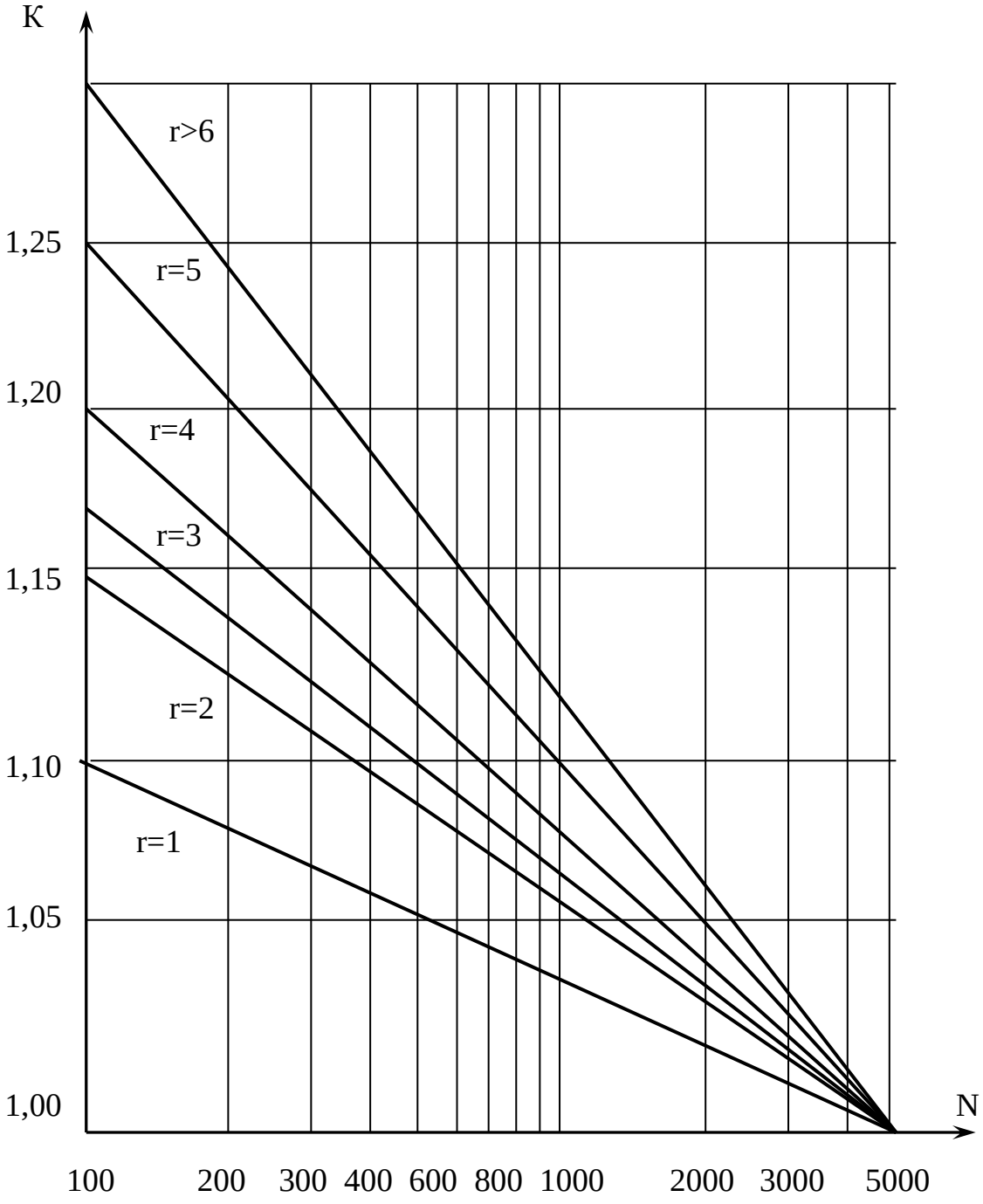
Конденсатори	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
159. Скляні та керамічні	0,0005
160. Слюдяні	0,0400
161. Паперові та металопаперові	0,0010
162. Електролітичні оксидно-напівпровідникові	0,0030
163. Електролітичні інші	0,0200
164. Плівкові, лакоплівкові	0,0400
165. Комбіновані	0,0400

Таблиця Д 80

З'єднувачі	$\lambda_E \cdot 10^{-6}, 1/год$
166. Прямокутні приладові нормальні	0,01
167. Прямокутні приладові малогабаритні	0,02

Додаток 4

Залежність коефіцієнта К від кількості механіко-кінематичних систем та від складності прилада (від кількості елементів)



Графік залежності коефіцієнта К від кількості механіко-кінематичних систем r, від складності приладу (від кількості елементів N)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки: Навч. посібн. - 2-ге вид., перероб. і доп. - Харків: НТУ «ХПІ», 2005. –524 с.

2. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM).

3. ДСТУ 4811:2007 Насіння олійних культур. Методи визначення вологості. Київ, Держпоживстандарт України, чинний від 01.01.2007.

4. OIML R-34 Accuracy classes of measuring instruments. Edition 1979. International recommendation.

5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.-Geneva: ISO, 1993.-101 p.

6. Державний стандарт України. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності. ДСТУ 2992-95. Київ, 1995.

7. Єгоров А.Б. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки. Навчальний посібник. - Харків, 2012. –174 с.

8. Захаров І.П. Порівняльний аналіз характеристик точності вимірювань: монографія/ І.П. Захаров. - Харків: Оберіг, 2019. - 100 с.

9. Державний стандарт України. Засоби радіоелектронні. Надійність резервованих систем. ДСТУ 2566-94, Київ, 1994.

ЗМІСТ

Вступ…… ……3

РОЗДІЛ 1. Основні відомості із теорії похибок вимірювань……...5

1.1. Похибки вимірювань…….....5

1.1.1. Умови проведення вимірювань або експлуатації ЗВТ……....5

1.1 2. Класифікація похибок вимірювань……7

1.2. Похибки засобів вимірювальної техніки……...….10

1.3. Подання результатів вимірювань……13

1.4. Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки……15

1.4.1. Визначення та нормування метрологічних характеристик ЗВТ……..15

1.4.2. Способи завдання класів точності ЗВТ…….16

1.5. Визначення сумарної невилученої похибки вимірювань……..21

1.6. Практичні завдання з визначення сумарної невилученої систематичної похибки вимірювань……..22

Контрольні питання……..26

РОЗДІЛ 2. Імовірнісні і статистичні характеристики результатів вимірювань і похибок вимірювань…….……27

2.1. Закони розподілу випадкових величин……..28

2.1.1. Інтегральний та диференційний закони розподілу похибок і результатів вимірювань……28

2.1.2. Визначення імовірності знаходження випадкової величини у заданому інтервалі……....31

2.2. Диференційні закони розподілу випадкових величин

2.2.1. Нормальний закон розподілу похибок і результатів вимірювань

2.2.2. Прямокутний закон розподілу похибок і результатів вимірювань……..…..32

2.2.3. Трикутний закон розподілу похибок і результатів вимірювань ……...32

Контрольні питання……38

РОЗДІЛ 3. Елементи теорії надійності……..……39
3.1. Основні поняття надійності…….39
3.2. Системи і елементи…….…… …..39
3.3. Класифікація відмов…….……41
3.4. Показники надійності (імовірнісні моделі показників)……42
3.4.1. Показники безвідмовності…… ……42
3.4.2. Показники ремонтопридатності…… …….. …..42
3.5. Оцінка показників безвідмовності за результатами випробувань (статистичні моделі показників)…….……..43
3.6. Основний закон надійності……..…45
3.7. Структурні моделі надійності……..…...46
3.7.1. Послідовна структура елементів……..…..……..…46
3.7.2. Паралельна структура елементів……..……46
3.8. Додаткові показники, що характеризують експлуатаційну надійність технічних виробів……..48

РОЗДІЛ 4. Методика розрахунку показників надійності……...50
4.1. Основні положення……..50
4.2. Класифікація методів розрахунку…… …..52
4.3. Методи розрахунку надійності за раптовими відмовами при послідовному з’єднанні елементів……..53
4.4. Вибір вихідних даних для розрахунку…… ….....54
4.5. Методика розрахунку……..… ….56
4.6. Порядок оформлення результатів розрахунку……. …..60
4.7. Приклад розрахунку надійності…….…....61

РОЗДІЛ 5. Завдання для розрахунку надійності……..……...71
Контрольні питання……73

6. Додатки……....74
Додаток 1. Таблиці поправкових функцій і коефіцієнтів. Значення інтенсивностей відмов…….……....74
Додаток 2. Поправкові коефіцієнти до значень λ_0 електричних та електромеханічних комплектуючих виробів……..…84
Додаток 3. Значення інтенсивностей відмов типових елементів за обмеженим числом випробувань……..103
Додаток 4. Залежність коефіцієнта К від кількості механіко-кінематичних систем та від складності прилада (від кількості елементів)……....107
Список літератури……108

Навчальне видання

ЩАПОВ Павло Федорович
ЧУНІХІНА Тетяна Віталіївна
ЧМИХОВА Оксана Володимирівна

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Навчально-методичний посібник
для студентів спеціальностей 171 «Електроніка»,
175 «Інформаційно-вимірювальні технології»,
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Відповідальний за випуск доц. Балєв В. М.

Роботу до видання рекомендував Пугановський О. В.

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 72

Підп. до друку 2024 р. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 3,8

Видавничий центр НТУ «ХПІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Електронне видання