

## РОЗДІЛ 2. СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ І ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ РЕА

### Лекція 4. СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

- 1 Критерії й кількісні характеристики надійності
- 2 Ймовірність безвідмовної роботи
- 3 Ймовірність відмови
- 4 Інтенсивність відмов
- 5 Середній час безвідмовної роботи

#### *1 Критерії й кількісні характеристики надійності*

Найбільше часто застосовується наступне визначення поняття "надійність". **Надійність** – властивість об'єкта зберігати здатність до виконання своїх функцій у заданих умовах експлуатації. Під об'єктом тут мається на увазі елемент розрахунку надійності (резистор, конденсатор, транзистор, діод, мікросхема, вузол, пристрій, прилад або система), що враховується при розрахунку надійності як окрема самостійна частина, що має свій кількісний показник надійності.

**Відмова** – подія, після виникнення якого об'єкт втрачає здатність виконувати свої функції. Під відмовою варто розуміти не тільки повне порушення працездатності апаратури, але й часткове погіршення одного або декількох основних технічних параметрів, в основному метрологічних, тобто вихід цих параметрів за встановлені межі, що зазначені в технічних умовах (ТУ) на об'єкт.

*Раптові* відмови виникають у результаті різкої стрибкоподібної зміни основних параметрів під впливом багатьох випадкових факторів, пов'язаних із внутрішніми дефектами елементів, порушенням робочих режимів, помилками обслуговуючого персоналу й інших несприятливих впливів.

*Для поступових* відмов характерно плавна зміна параметрів у результаті старіння або зношування елементів. Слід зазначити, що появі раптових відмов передують схована зміна властивостей деталей або компонентів у часі, які не завжди вдається виявити. Тому поділ відмов на раптові поступові носить умовний характер.

*До стійких* відносять відмови, які усуваються тільки в результаті регулювання, проведеного ремонту або у випадку заміни елемента, що відмовив.

*Тимчасові* відмови можуть мимовільно зникати без втручання обслуговуючого персоналу внаслідок усунення їхньої причини, що викликала. Причинами таких відмов часто є ненормальні режими або умови роботи апаратури, наприклад, відхилення температури або вологості, зниження напруги мережі й т.д.

Багаторазово тимчасові відмови, що повторюються, називаються перемежовані.

Більше загальним, чим відмова, є поняття **несправність**, під якою мається на увазі невідповідність виробу одному або декільком вимогам, як у відношенні основних технічних параметрів і характеристик, так і відносно зовнішнього виду, зручності експлуатації й т. п. Не всі несправності є відмовами. Несправності, що не приводять до відмови називаються **дефектами**.

Кількісні показники надійності називають критеріями надійності.

I. Критерії безвідмовної роботи виробу, до яких відносять:

- а) ймовірність безвідмовної роботи;
- б) ймовірність відмови;
- в) частота відмов (FIT);
- г) інтенсивність відмов (FR);
- д) середній час безвідмовної роботи (MTBF);
- е) напрацювання на відмову (середній час).

II. Критерії відновлюваності:

- а) ймовірність відновлення;
- б) середній час відновлення;
- в) інтенсивність відновлення.

III. Критерії технічного обслуговування:

- а) ймовірність обслуговування;
- б) середній час обслуговування.

IV. Експлуатаційні критерії (коефіцієнти):

- а) коефіцієнт використання;
- б) коефіцієнт готовності;
- в) коефіцієнт простою;
- г) коефіцієнт вартості експлуатації.

## *2 Ймовірність безвідмовної роботи*

Під ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$  елемента розуміється ймовірність того, що в заданому інтервалі часу  $t$  при заданих умовах експлуатації не відбудеться жодного відмови.

Якщо позначити через  $\Delta t$  час безперервної справної роботи елемента від початку роботи до відмови, а через  $t$  - час, протягом якого необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи виробу, то  $P(t)$  є ймовірність того, що значення випадкової величини  $\Delta t$  буде більше або дорівнює  $t$ .

$$P(t) = P\{\Delta t \geq t\}.$$

Очевидно, що  $P(0) = 1$ ;  $P(\infty) = 0$ .

Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу наведена на рис. 1. Ця залежність називається функцією надійності.

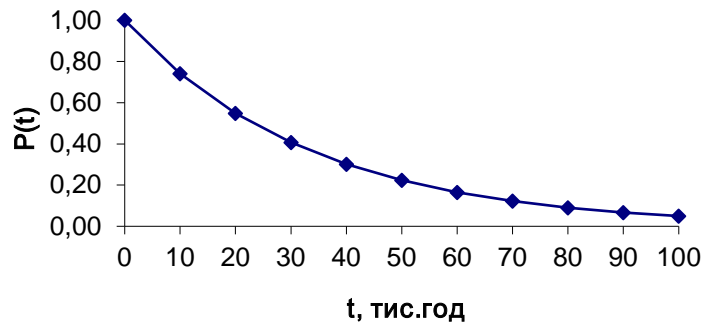


Рисунок 1 – Функція надійності

Ймовірність безвідмовної роботи теоретично визначається з рівняння:

$$P(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=0}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

де  $N_0$  - число елементів на початку випробувань;

$n_i$  - число елементів, що вийшли з ладу, за інтервал часу  $\Delta t$  ;

$t$  - час, для якого визначається  $P(t)$ ;

$\Delta t$  - прийнята тривалість інтервалу часу.

Практично

$$P(t) = \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

тобто весь час  $t$  розбивають на кілька рівних інтервалів часу  $\Delta t$  і підраховують  $n_i$  число елементів, що вийшли з ладу, за кожний інтервал часу  $\Delta t$ , а потім їх додають за увесь час визначення  $P(t)$ .  $P(t)$  об'єкта визначають через розраховані ймовірності безвідмовної роботи елементів, що входять у нього.

**Задача 1.** На випробування поставлено 60 блоків живлення. Випробування проводились протягом 2000 годин. Під час випробувань відмовило 6 блоків живлення. Визначити ймовірність безвідмовної роботи виробів за час 2000 годин.

$$P(t) = \frac{60 - 6}{60} = 0,9$$

На основі теореми множення ймовірностей  $P(t)$  виробу може бути представлена у вигляді добутку ймовірностей безвідмовної роботи всіх елементів, що входять у цей виріб:

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) \cdots p_N(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t),$$

При цьому передбачається, що відмови елементів є подіями незалежними й вихід з ладу кожного з  $N$  елементів веде до відмови всього об'єкта. Якщо надійність елементів однакова, тобто

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_N(t) = p(t),$$

то

$$P(t) = [p(t)]^N.$$

Видно, що надійність вимірювальної системи істотно залежить від надійності й числа елементів, що входить до неї. Ефективним засобом підвищення надійності є як підвищення надійності елементів, так і зменшення їхнього числа.

### 3 Ймовірність відмови

У ряді випадків надійність системи зручніше оцінювати за ймовірністю відмови.

Ймовірність відмови  $Q(t)$  – це ймовірність того, що в заданому інтервалі часу й при заданих умовах експлуатації відбудеться хоча б одна відмова. Вона являє собою ймовірність того, що випадкова величина  $\Delta t$  (час справної роботи) прийме значення, менше наперед заданого часу  $t$ , для якого визначається ця ймовірність, тобто.

$$Q(t) = p(\Delta t \leq t).$$

Так як справна робота й відмова є подіями протилежними, то

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

Статистичне значення ймовірності відмови дорівнює відношенню числа елементів, що відмовили, за розглянутий проміжок часу до початкового числа елементів:

$$Q(t) \approx \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}.$$

Якщо ж потрібно визначити ймовірність того, що елемент, що проробив час від 0 до  $t_1$ , буде безвідмовно працювати протягом наступного інтервалу часу від  $t_1$  до  $t_2$ , то для цього необхідно визначити умовну ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}.$$

### 4 Інтенсивність відмов

Під інтенсивністю відмов  $\lambda(t)$  розуміють відношення числа елементів, що відмовили, за одиницю часу до середнього числа елементів, що справно працюють у даний відрізок часу:

$$\lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t_i},$$

де  $\Delta n_i$  – число елементів, що відмовили, за проміжок часу  $\Delta t_i$ ;  $n_i$  – число елементів, що відмовили, до початку проміжку часу  $\Delta t_i$ ;  $N$  – загальне число виробів.

**Задача 2.** На випробування поставили 200 виробів. За 100 годин роботи відмовило 25 виробів. За наступні 10 годин відмовило ще 7 виробів. Визначити ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови на моменти часу  $t_1 = 100 \text{ год.}$  та  $t_2 = 110 \text{ год.}$ , інтенсивність відмов на проміжку часу між  $t_1 = 100 \text{ ч}$  и  $t_2 = 110 \text{ ч}$ .

$$P(100) = 1 - \frac{n(100)}{N} = 1 - \frac{25}{200} = 0,875;$$

Визначимо кількість виробів, що відмовило, на момент часу  $t_2 = 110 \text{ год.}$

$$n(110) = n(100) + \Delta n = 25 + 7 = 32 \text{ шт.}$$

$$P(110) = 1 - \frac{n(110)}{N} = 1 - \frac{32}{200} = 0,84.$$

Ймовірність відмови дорівнює:

$$Q(100) = \frac{n(100)}{N} = \frac{25}{200} = 0,125, \quad Q(110) = \frac{n(110)}{N} = \frac{32}{200} = 0,16.$$

Інтенсивність відмов визначається за формулою:

$$\lambda(110) = \frac{\Delta n(110)}{(N - n(110))\Delta t} = \frac{7}{(200 - 32) \cdot 10} = 0,00417 \text{ год}^{-1}.$$

Стандартна поведінка відмов описується широко відомою кривою інтенсивності відмов, яка має U-подібну форму.

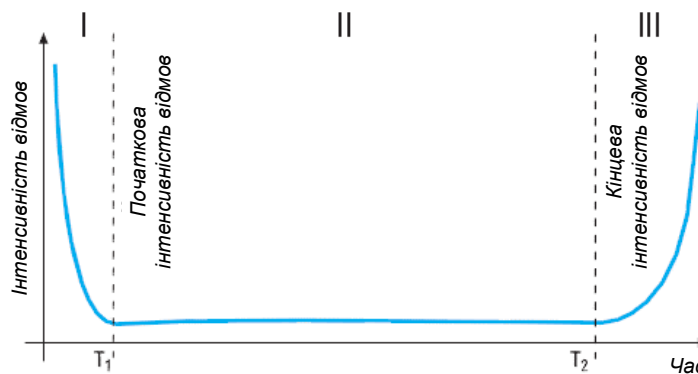


Рисунок 2 – Графік зміни інтенсивності відмов системи від часу

Форма кривої приблизно однакова для усіх компонентів та систем, відмінність тільки у значеннях часу. Крива поділена на три основні частини (зони): I – початковий період; II – період нормальної експлуатації; III – період старіння. Зона I характеризує область ранніх відмов, які викликані прихованими дефектами матеріалу або наявністю виробничих дефектів, які не були виявлені при приймальних випробуваннях, до того як виріб був доставлений

замовнику. Період початкової інтенсивності відмов має відносно коротку тривалість. Для складних систем зона початкових відмов не перевищує початковий період у 200 годин до початку їх використання.

Вплив температури – це один з факторів, що прискорює вплив на зростання інтенсивності відмов. Час переходу  $T_1$  може бути суттєво скорочено, якщо використовувати термотренування в термокамері. Якщо виріб витримує її при повному навантаженні та при підвищених температурах, то таке термотренування протягом 4 годин є достатнім для виявлення практично всіх початкових відмов виробу. Для виробів, що експлуатуються у над складних умовах (обладнання для залізниць) час термотренування встановлюють до 24 годин.

Період нормальної експлуатації відрізняється тим, що в зоні II інтенсивність відмов відповідає заданій та знаходиться на стабільно низькому рівні. Другий перехід ( $T_2$ ) від періоду нормальної експлуатації до періоду старіння залежить від багатьох факторів. Це може бути якість самої конструкції та комплектуючих, якість виготовлення та монтажу, фактори впливу навколишнього середовища. Зона III представляє собою кінець життєвого циклу продукту, протягом якого зниження продуктивності викликано фізичним зносом та хімічною деградацією матеріалів, що застосовувались. У цей період можливо очікувати виникнення раптових лавинних відмов, що наростають.

Інтенсивність відмов ( $FR$ )  $\lambda$  має розмірність 1/година. Для вимірювання  $FR$  виробники підраховують відносне число приладів, що можуть відмовити протягом кожних  $10^5$  годин роботи (тобто відсоток на 1000 год). Більш кращою одиницею виміру є кількість відмов на  $10^9$  годин експлуатації виробу FIT (Failures In Time), оскільки вона дозволяє більш зручно та наочно відобразити над малі інтенсивності відмов.  $FIT = 10^9 / MTBF$

Для більшості електронних елементів та апаратури, що їх використовує, характерним для нормальної роботи є сталість інтенсивності відмов. Тому інтенсивність відмов є зручною характеристикою надійності виробів разового застосування (апаратури, що не відновлюється).

При  $\lambda(t) = \text{const}$  ймовірність безвідмовної роботи виробу дорівнює

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

Таким чином, знаючи інтенсивність відмов елементів як функцію часу, можна визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом часу  $t$ .

**Задача 3.** Інтенсивність відмов системи дорівнює  $\lambda=4,5 \cdot 10^{-5}$  год $^{-1}$ . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи за час 100 годин роботи та середнє напруження на відмову.

$$\text{Ймовірність безвідмовної роботи } P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0,9955.$$

Так як  $\lambda t$  набагато менше 0,1, то ймовірність безвідмовної роботи можна визначити за скороченою формулою:

$$P(t) \approx 1 - \lambda t = 1 - 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 1 - 0,0045 = 0,9955.$$

Математичне очікування середнього напрацювання на відмову дорівнює

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 22222,2 \text{ год.}$$

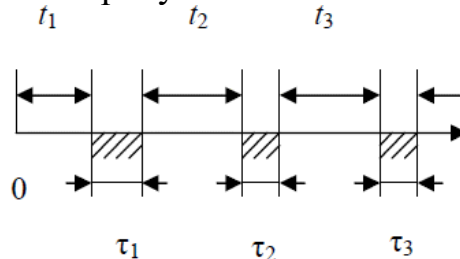
### 5 Середній час безвідмовної роботи

Надійність однотипних пристроїв або елементів з точки зору тривалості їх роботи до першої відмови характеризується середнім часом безвідмовної роботи, під яким розуміють математичне очікування часу роботи пристрою до відмови (рис. 3):

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N_0},$$

де  $N_0$  - число елементів, що випробуються;

$t_i$  - час справної роботи  $i$ -го виробу.



$t_1, t_2, t_3$  – інтервали безвідмовної роботи пристрою;

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – інтервали з усунення відмов

Рисунок 3 – Процес функціонування пристрою (одного екземпляра) протягом календарного періоду

За значенням середнього часу безвідмовної роботи можна швидко визначити кількість запасних елементів для роботи приладу протягом календарного часу.

**Задача 4.** На випробування поставлено 60 блоків живлення. Випробування проводились протягом 2000 годин. Зафіксовані відмови блоків живлення у такі проміжки часу:  $t_1 = 1210$  год.;  $t_2 = 480$  год.;  $t_3 = 900$  год.;  $t_4 = 700$  год.;  $t_5 = 1900$  год.;  $t_6 = 1100$  год. Решта блоків живлення не відмовили. Знайти середнє значення напрацювання до першої відмови.

Середнє значення напрацювання до першої відмови це математическое очікування напрацювання до першої відмови і визначається так:

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{60} (1210 + 480 + 900 + 700 + 1900 + 1100 + 2000 \cdot 54) = 1904,83 \text{ год.}$$

**Задача 5** На випробування поставлено 3 стенда. Під час випробувань у першого стенда було зафіксовано 144 відмови, у другого – 160 відмов, у третього – 157 відмов. Сумарний час напрацювання на відмову для першого стенда склав 3250 годин, для другого – 3600 годин, для третього – 2800 годин. Визначити середній час напрацювання до відмови та середній ресурс стенда.

Середній час напрацювання до відмови визначається так:

$$T_{cp} = \frac{t_{cym}}{n(t_{cym})} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{144 + 160 + 157} = 20,9 \text{ год.}$$

Середній ресурс дорівнює:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} = \frac{3250 + 3600 + 2800}{3} = 3216,7 \text{ год.}$$

Середній час безвідмовної роботи пов'язаний з ймовірністю безвідмовної роботи такою залежністю

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

MTBF (Mean Time Between Failures) означає «Середній час напрацювання на відмову». MTBF – показник надійності виробу або системи, що допускає ремонт. Він відображає інтенсивність випадкових відмов, виключаючи систематичні несправності, що викликані помилками при проектуванні (такими як збій програмного забезпечення) або дефектами виготовлення (вироби на початку терміну служби), а також виключає знос у ході експлуатації (вироби в кінці терміну служби).

Значення MTBF вимірюється в годинах. Чим вище MTBF, тим надійніше виріб або система.

Значення MTBF може бути зазначено лише для заданого режиму експлуатації та умов навколишнього середовища.

Якщо система складається з декількох елементів, то інтенсивність відмов кожного елемента додається (відмова одного елемента викликає відмову всієї системи).

$$MTBF = 1 / \lambda_{\Sigma},$$

де  $\lambda_{\Sigma}$  – інтенсивність відмов кожного елемента системи.

Значення середнього часу безвідмовної роботи MTBF можуть викликати велику плутанину, тому що вони часто неправильні, а іноді й свідомо спотворені недобросовісними виробниками. Час напрацювання на відмову рівний 1 млн. год. не означає, що виріб має термін служби, який дорівнює:

$$1\ 000\ 000 / (24 \times 365) = 114 \text{ років!}$$

Напрацювання на відмову тут просто визначається як величина, зворотна фактичній інтенсивності відмов. Так, якщо 1 з 100 пристроїв мав відмову після 10 000 годин роботи, то значення MTBF дорівнює:

$$MTBF = 10\ 000 / (1/100) = 1 \text{ млн. годин.}$$

І навпаки, якщо інтенсивність відмов в даній області застосування повинна бути менше, ніж 1% у рік для певного встановленої кількості, то необхідне значення напрацювання на відмову MTBF такого пристрою має бути:



$$MTBF = (365 \times 24) / 1\% = 876\,000 \text{ ч.}$$

Значення MTBF у тисячі або мільйони годин призводять до плутанини для тих, хто недостатньо знайомий з ними. Якщо розглянути приклад, наведений вище, то дійсно пристрій має значення MTBF рівне 1 млн. годин (114 років), але один виріб з усіх може відмовити вже після перших 13 місяців використання. Можливо, більш зрозумілий приклад, що стосується життя людини, допоможе пояснити цей «прорахунок». Середня інтенсивність «відмов» для людини у віці 25 років становить 0,1%, тобто ймовірно, що один 25-річний чоловік з тисячі може померти. Роблячи розрахунок надійності, ми отримуємо напрацювання на відмову MTBF для людей, що дорівнює 800 рокам! У 25-річному віці більшість людей досить здорові, і основною причиною їх смерті є нещасні випадки. Якби люди не старіли і не страждали від хвороб, то могли б жити до 800 років. З іншого боку, якби для розрахунку був обраний інший вік, скажімо 45 років, тоді б побачили зовсім інші значення MTBF для людини. Це пов'язано з тим, що люди починають «зношуватися» вже у відносно ранньому віці.

Оскільки інтенсивність відмов під час останньої фази періоду нормальної експлуатації змінюється за експоненціальним законом, то ймовірність безвідмовної роботи може бути розрахована з використанням значення MTBF за такою формулою:

$$P(T) = e^{(-T/MTBF)}.$$

Якщо час (T) дорівнює значенню середнього часу напрацювання на відмову (MTBF), то рівняння зводиться до значення  $e^{-1}$ , або до ймовірності 37%. Це можна інтерпретувати так: при  $T = MTBF$  буде працювати 37% всіх виробів.

**Задача 6.** Панель OLDHAM MX 43 (4-канальний варіант виконання, напруга живлення 24 В, робоча температура 25°C) має MTBF = 174805 годин (19,95 років).

Ймовірність того, що панель пропрацює 5 років до того, як відбудеться її відмова, дорівнює  $P = e^{(-5/19,95)} = 77,8\%$ .

**Задача 7.** Детектор газу OLDHAM OLCT 100 призначений для виявлення небезпечних газів. Його показники надійності: інтенсивність невиявлених небезпечних відмов ( $\lambda_{du}$ ) =  $189,10^{-9}$  год<sup>-1</sup>; доля безпечних відмов (SFF) = 92,9%

$$SFF = 1 - (\lambda_{du} / \lambda_{\Sigma}) \Rightarrow \lambda_{\Sigma} = 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ год.}^{-1} = 0,0233 \text{ рік}^{-1}$$

$$MTBF = 1 / \lambda_{\Sigma} = 42,9 \text{ роки.}$$

Ймовірність того, що детектор пропрацює 4 роки дорівнює:  $P = e^{(-4/42,9)} = 91,1\%$ .

## Лекція 5. НАДІЙНІСТЬ РАДІОДЕТАЛЕЙ ТА РАДІОКОМПОНЕНТІВ

1. Вплив умов експлуатації
2. Методика розрахунку надійності

### *1 Вплив умов експлуатації*

Одним з найбільш ранніх системних підходів до надійності електронних компонентів і складальних одиниць є довідник армії США «Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment» («Військовий довідник. Прогнозування надійності електронного устаткування»), відомий як стандарт MIL-HDBK-217. Він складається з великої бази даних по відмовам різних компонентів та заснований на емпіричному аналізі великого числа експлуатаційних відмов електрообладнання, електронних та електромеханічних компонентів.

Довідник постійно оновлювався та вдосконалювався аж до 1995 року, потім його остаточний варіант був названий «MILHDBK 217. Редакція F з Приміткою 2». На сьогодні стандарт більше не оновлюється, але наведені в ньому дані і методи до цих пір не втратили своєї актуальності.

MIL-HDBK містить два методи прогнозування надійності: розділ аналізу за коефіцієнтами навантаження елементів у конкретній схемі PSA (PSA - Stress Analysis) та розділ із кількісного аналізу PCA (PCA - Parts Count Analysis). Метод PSA вимагає великої та дуже докладної інформації і, як правило, використовують щодо завершальних стадій розробки, коли при перевірці надійності можуть бути використані дані і результати вимірювань попередніх випробувань. На відміну від нього метод PCA передбачає наявність самої мінімальної інформації, такої як загальна кількість частин, рівень їх якості та умови середовища їх експлуатації. Найбільша перевага методології стандарту MIL HDBK 217 полягає в тому, що метод PCA дає прогноз надійності, ґрунтуючись лише на переліку елементів та області використання виробу. Таким чином, показник надійності може бути розрахований для продукції, що навіть не виготовлена. Для цієї мети застосовується розрахунок інтенсивності відмов за такою формулою:

$$\lambda_p = (\sum N_c \lambda_c) (1 + 0.2 \pi_E) \pi_F \pi_Q \pi_L,$$

де  $N_c$  - кількість елементів (окремо по кожному типу елементів);  $\lambda_c$  - інтенсивність відмов кожного типу елементів (значення взяті з бази даних);  $\pi_E$  - коефіцієнт, що враховує фактори впливу навколишнього середовища (залежить від області застосування);  $\pi_F$  - комплексний функціональний коефіцієнт (враховує додатковий вплив, викликаний взаємодією елементів схеми);  $\pi_Q$  - коефіцієнт, що враховує фактор рівня якості компонента (стандартний або спеціально відбракований елемент);  $\pi_L$  - коефіцієнт, що враховує новизну компонента (добре відомий, що пройшов випробування або новий). Розрахунок дасть показник для кожного елемента, що використовується. Загальна надійність може бути знайдена шляхом додавання всіх окремих результатів.

Стандарт MIL-HDBK-217 містить моделі надійності, розроблені на основі військових програм загального призначення. Однак великий вплив на його надійність надає область застосування. Якщо область застосування відома, то для розрахунку MTBF може бути використаний поправочний коефіцієнт щодо значень, встановлених для стаціонарного наземного обладнання (GB), що працює в легких умовах експлуатації. Цей базовий коефіцієнт обліку умов навколишнього середовища прийнятий рівним 1 (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Класифікація обладнання у відповідності з MIL-HDBK-217 F

Робоче середовище використання	$\pi_E$ символ	Опис згідно MI-HDBK-271F	Комерційна інтерпретація або приклади
Наземне стаціонарне обладнання	GB	Стаціонарне обладнання з контрольованою температурою і вологістю середовища, легкодоступний для обслуговування	Лабораторне обладнання, контрольовано-вимірювальні прилади, настільні ПК, стаціонарне телекомунікаційне обладнання
Наземне мобільне обладнання	GM	Обладнання, встановлене в колісних або гусеничних транспортних засобах, і переносне обладнання	Автомобільна електроніка, переносне радіо та телекомунікаційне обладнання, портативні ПК
Умови в закритих відсіках кораблів	NS	Устаткування в закритих або у внутрішніх приміщеннях на надводних кораблях або підводних човнах	Навігаційне і радіообладнання, прилади, розміщені у внутрішніх відсіках корабля
Умови у вантажних відсіках літаків	AIC	Типові умови в вантажних відсіках, в яких можуть знаходитися льотні екіпажі	Кабіни і відсіки, що знаходяться під нормальним тиском, розважальне обладнання для пасажирів та обладнання, не пов'язане із забезпеченням безпеки, і критично не важливі додатки
Умови космічного польоту	SF	Умови орбітального польоту. Носій знаходиться ні в активному стані, ні в режимі повернення в атмосферу	Орбітальні комунікаційні супутники, обладнання яких експлуатується спільно тільки один раз
Умови пуску ракети	ML	Важкі умови, що відносяться до запуску ракет	Сильні вібрації і дуже високе прискорення, умови запуску супутника

Таблиця 2 – Поправочні коефіцієнти для середнього значення безвідмовної роботи (MTBF)

Робоче середовище використання	$\pi_E$ символ	$\pi_E$ значення	Дільник
Наземне стаціонарне обладнання	GB	0.5	1
Наземне мобільне обладнання	GM	4	1.64
Умови в закритих відсіках кораблів	NS	4	1.64
Умови у вантажних відсіках літаків	AIC	4	1.64
Умови космічного польоту	SF	0.5	1
Умови пуску ракети	ML	12	3.09

Наприклад, DC/DC-перетворювач з MTBF, рівним 1 млн год., відповідно до специфікації (яка базується на показниках для обладнання класу GB) необхідно буде «знизити» до рівня порядку 610 тис. год., якщо цей перетворювач буде використовуватися в портативній переносній техніці. Це слід виконати, щоб врахувати вплив додаткових зовнішніх впливів, таких як удари, поштовхи, різкі зміни температури і т. п..

Вплив кліматичних умов на надійність апаратури складається із впливу температури, вологості, тиску, чистоти повітря.

В умовах експлуатації виникають впливи механічного характеру у вигляді ударів, лінійних прискорень, вібрацій, а також впливу обслуговуючого персоналу при відвантаженні, транспортуванні радіоелементів в упакуванні або в складі апаратури.

Надійність зменшується зі збільшенням робочої температури, так що вказаний в специфікації параметр MTBF, як правило, відповідає значенню тільки при кімнатній температурі навколишнього середовища, і це слід взяти до уваги. Причина, чому надійність настільки залежить від температури, пов'язана з енергією активації хімічних процесів. Для більшості технічних специфікацій в якості опорної температури  $T_{REF}$  береться номінальна температура в приміщенні, або  $+25^{\circ}C$ . Це дає нам такі фактори прискорення в залежності від температури навколишнього середовища  $T_{AMB}$  (табл. 3).

Таблиця 3 – Коефіцієнти прискорення для різних температур навколишнього середовища  $T_{AMB}$

$T_{AMB}, ^{\circ}C$	Коефіцієнт прискорення
<b>+25</b>	1
<b>+30</b>	1,5
<b>+40</b>	3
<b>+50</b>	6
<b>+60</b>	12
<b>+70</b>	22
<b>+80</b>	40

З цих простих співвідношень можна бачити, що подвоєння температури навколишнього середовища від  $+25$  до  $+50^{\circ}C$  збільшує ефект старіння на коефіцієнт, що дорівнює шести. А якщо температура збільшена ще на  $+25^{\circ}C$ , тобто до  $+75^{\circ}C$ , то ефект старіння збільшиться вже приблизно в 30 разів. Таке ж співвідношення працює й у зворотному напрямку. Зниження температури підвищує надійність електронних компонентів. Проте при дуже низьких температурах (нижче  $-20^{\circ}C$ ) вже інші чинники, такі як механічні напруги через різницю в коефіцієнтах розширення різних матеріалів або те, що при низьких температурах паяні з'єднання стають крихкими, можуть викликати більш високу швидкість інтенсивності відмов.

Кожний радіоелемент апаратури випробовує електричне навантаження, що обумовлено або передачею електричного сигналу по колу, до складу якої він входить, або подачею напруги живлення, що забезпечує нормальну роботу елемента. Для кожного елемента є граничні номінальні припустимі значення електричного навантаження (припустимі значення напруги живлення, потужності, що розсіюється; струмів споживання, вхідних і вихідних сигналів, температури й вологості навколишнього середовища). Доки електричні навантаження при роботі елемента в апаратурі значно менше припустимих, їхній вплив на надійність незначний. Як тільки фактичні електричні навантаження елемента наближаються до припустимих меж, різко зростає його інтенсивність відмов.

Причин зміни електричних навантажень при роботі апаратури багато, наприклад, зміна напруги живлення мережі, зміна умов експлуатації, зміна навантаження наступних вузлів.

Для обліку впливу електричного навантаження на інтенсивність відмов використовують коефіцієнт навантаження  $K_n$  під яким, у загальному випадку, розуміють відношення розрахункового або робочого значення деякого параметра, що характеризує роботу елемента в реальному режимі, до його номінального значення:

$$K_n = K_{роб} / K_{ном}$$

Для кожного елемента параметр, що визначає електричне навантаження, є різним. Так для резисторів і транзисторів таким параметром є потужність розсіювання, тому коефіцієнт навантаження для них визначається з формули:

$$K_n = P_{роб} / P_{ном}$$

Для конденсаторів – напруга, що прикладена до нього й

$$K_n = U_p / U_{ном}$$

Деякі елементи можуть мати два й більше параметри, що визначають електричне навантаження. Розрахункове або робоче значення параметра елемента, що визначає його електричне навантаження, визначається або шляхом розрахунку за схемою електричною принциповою, або шляхом виміру під час проведення випробувань пристрою. Полегшення режимів роботи є одним з можливих шляхів підвищення надійності. Термін служби збільшується за рахунок роботи в розвантаженому режимі. Зміна інтенсивності відмов при номінальному (1) і розвантаженому (2) режимах показана на рис. 2.

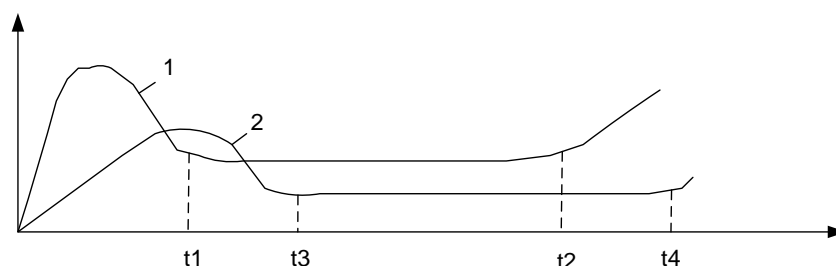


Рисунок 2 – Інтенсивність відмови елементів

З рис. 2 видно, що при розвантаженому режимі роботи елементів значення інтенсивності відмов зменшується в порівнянні з інтенсивністю відмов при номінальному режимі роботи, а тривалість періоду нормальної роботи збільшується.

У зв'язку із цим у більшості зразків апаратури більша частина елементів працює в розвантаженому режимі. Практика показує, що понад 50% резисторів в апаратурі працюють із  $K_n < 0,2$ , однак малі значення  $K_n$  приводять до збільшення габаритів і ваги апаратури. Тому рекомендується вибирати  $K_n$  у межах  $0,4 \dots 0,8$ . Вплив електричних перевантажень зводиться до декількох явищ, головним з яких зміна температурного режиму, що приводить при підвищенні температури до відмови. Розділити вплив електричного навантаження й підвищення температури навколишнього середовища досить складно, тому на практиці при розрахунках надійності користуються коефіцієнтом впливу (режиму), що залежить від електричного навантаження й температури навколишнього середовища. Значення коефіцієнта режиму розраховується для кожного типу елементів по відповідній залежності.

Таблиця 4 – Середнє значення інтенсивності відмов радіоелементів

Групи ІМС	Середньо групові значення інтенсивності відказів $\lambda, 1 \cdot 10^{-6} [1/ч]$
<b>1. Інтегральні мікросхеми</b>	
Мікросхеми інтегральні гібридні	0,42
Мікросхеми інтегральні напівпровідникові цифрові	0,21
Мікросхеми інтегральні напівпровідникові аналогові	0,22
<b>2. Напівпровідникові прилади</b>	
Діоди:	
випрямні	0,85
універсальні	0,1
імпульсні	0,043
Діодні зборки	0,045
Стабілітрони	0,07
Транзистори біполярні	0,29
Транзисторні зборки	0,28
Транзистори польові	0,3
Оптопари:	
діодні	0,14
транзисторні	0,29
резисторні	0,8
Діоди випромінюючі інфрачервоного діапазону	0,19

Вид елементів	$\lambda \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
<b>3. Резистори</b>	
Резистори постійні не дратові металодіелектричні вуглеродні	0,22 0,015
Резистори постійні дратові та метало фольгові	0,01
Резистори змінні не дратові плівкові композиційні плівкові композиційні об'ємні	0,01 0,007 0,024
Резистори змінні дратові	0,02
Терморезистори	0,0013
Набори резисторів	0,02
Резисторні мікросхеми	0,01
<b>4. Конденсатори</b>	
Конденсатори постійної ємності: керамічні склокерамічні Склокерамічні з необмеженим діелектриком Слюдяні Паперові та метало паперові Оксидно-електролітичні Оксидні-напівпровідникові З органічним синтетичним діелектриком	0,03 0,02 0,02 0,01 0,01 0,3 0,06 0,02
Конденсатори підстроювальні з твердим діелектриком	0,015
<b>5. Елементи комутації</b>	
Реле електромагнітні мало об'ємні (на 1 контактну пару) Реле електромагнітні нормальні (на 1 контактну пару) Магнітокеруємі контакти	0,8 0,4 0,00074
Рознімачі циліндричні нормальних об'ємів малогабаритні для друкованого монтажу	0,0065 0,0016
Рознімачі прямокутні нормальних об'ємів для друкованого монтажу малогабаритні для друкованого монтажу	0,0027 0,0014
Перемикачі галетні	0,06
Тумблери	0,1
Кнопки	0,16
Мікроперемикачі	0,045
Перемикачі на базі герконів	0,13
Запобіжники	0,2

Вид елементів	$\lambda \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
<b>6. Трансформатори та дроселі</b>	
Трансформатор живлення	1,0
Трансформатор імпульсний	1,0
Трансформатор узгодження	0,2
Дроселі	0,033
Котушки індуктивності	0,01
<b>7. Індикатори</b>	
Індикатори напівпровідникові:	
одиничні	0,13
цифрові	0,07
буквено-цифрові	0,12
шкальні	0,36
графічні	0,53
мнемонічні	0,10
Індикатори газорозрядні:	
одиничні	2,50
шкальні	10,00
графічні	2,20
Індикатори люмінесцентні:	
цифрові одно розрядні	0,92
цифрові багато розрядні	10,00
Буквено-цифрові	0,34
шкальні	0,76
мнемонічні	1,20
Індикатори LCD	0,88
<b>8. Інші елементи</b>	
Друкований монтаж	0,0004
Навісний монтаж	0,00260
Ручна пайка з друкованим монтажем	0,0006 – 0,15
Ручна пайка з об'ємним монтажем	0,0002 – 0,04
Пайка хвилею припою	0,0001 – 0,03
Клемне з'єднання	0,0003 – 0,05
Точечна контактна зварка	0,002 – 0,03
Обжимка	0,00005 – 0,0015
Безпаяне з'єднання закруткою	0,00006 – 0,002
Закрутка з пайкою	0,0003 – 0,05

## *2 Методика розрахунку надійності*

Розрахувати надійність – значить визначити її кількісні характеристики за відомими характеристиками елементів, з яких складається апаратура. При цьому необов'язково обчислювати всі кількісні характеристики надійності. Так як більшість характеристик надійності взаємопов'язані між собою, то для оцінки надійності досить визначити обмежене число характеристик.



У загальному випадку метод розрахунку багато в чому визначається характером відмов та видом закону розподілу часу виникнення відмов. Для періоду нормального функціонування РЕА при раптовому характері відмов час виникнення відмов відповідає експонентному закону розподілу, для якого характерна умова  $\lambda = \text{const}$ . Тоді основні кількісні характеристики будуть зв'язані між собою такими залежностями:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t};$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t};$$

$$a(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t};$$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda};$$

$$\omega(t) = \lambda(t) = \lambda;$$

$$t_{cp} = T_{cp}.$$

Метод розрахунку залежить від способу з'єднання елементів. Розрізняють або основне, або резервне з'єднання елементів.

Основне з'єднання елементів – з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента веде до відмови всього з'єднання. При цьому елементи можуть мати послідовне, або паралельне, або змішане електричне з'єднання.

Резервне з'єднання елементів – з'єднання, при якому відмова з'єднання настає тільки в тому випадку, якщо відмовили основний і всі резервні елементи.

Інженерні методи розрахунку дозволяють зробити оцінку очікуваної надійності плати, вузла й усього пристрою на різних стадіях проектування. За цією ознакою методи розрахунку надійності можна розділити на наступні групи:

- 1) розрахунок норм надійності – на стадії розробки технічного завдання;
- 2) орієнтовний розрахунок надійності – на стадії ескізного проектування;
- 3) остаточний (повний) розрахунок з урахуванням режимів роботи елементів і факторів, що впливають на РЕА – на стадії технічного (робітника) проектування, випуску робочої документації;
- 4) експериментальна оцінка рівня надійності РЕА – на стадії стендових або натурних випробувань готового зразка.

Рекомендується такий порядок повного розрахунку надійності:

1) всі елементи пристрою розбиваються на кілька груп залежно від типу елемента, підраховується кількість груп  $k$  і кількість елементів у кожній групі  $n_i$ ;

2) для кожного елемента розраховується коефіцієнт навантаження, визначаються коефіцієнт експлуатації, робоча температура навколишнього

середовища й інші фактори, що пов'язані із застосуванням даного елемента. За таблицями з довідника визначаються поправочні коефіцієнти для даного елемента;

3) за таблицями визначають значення інтенсивності відмов для кожного типу елементів  $\lambda_i$ . Якщо для даного типу елементів немає значення  $\lambda_i$ , то береться середньо групове значення для даної групи елементів;

4) обчислюються значення експлуатаційних інтенсивностей відмов для елементів даного типу елементів як

$$\lambda_{\vartheta} = \lambda_i K_{\vartheta} \cdot \prod_{i=1}^m K_i,$$

де  $m$  - число поправочних коефіцієнтів для даної групи елементів;

5) обчислюються добутки  $n_{i\alpha} \cdot \lambda_i$ , що характеризують частку відмов, внесених елементами даної групи в загальну інтенсивність відмов пристрою;

6) обчислюється загальна інтенсивність відмов пристрою з урахуванням режимів роботи й умов застосування елементів шляхом додавання добутків  $n_{i\alpha} \cdot \lambda_{\vartheta i}$  по всім  $k$  групах за формулою

$$\lambda = \sum_{i=1}^k \lambda_{\vartheta i} \cdot n_i;$$

7) розраховується ймовірність безвідмовної роботи пристрою за формулою  $P(t) = e^{-\lambda t}$  для заданого часу безперервної справної роботи  $t_0$ ;

8) визначається напрацювання на відмову за формулою  $T_0 = 1 / \lambda$

У випадку розрахунку надійності складного пристрою роблять його поділ на окремі плати, каскади або вузли. Розраховують інтенсивність відмов спочатку окремих плат, каскадів або вузлів, а потім визначають інтенсивність відмов усього пристрою шляхом додавання інтенсивностей відмов плат, каскадів або вузлів, що входять до нього.

За результатами розрахунку будуються залежність  $P(t)$  та отримані дані порівнюються із заданими значеннями в ТУ й робиться висновок: відповідає спроектований пристрій необхідній надійності чи а ні.

Поряд з MIL 217F HDBK найбільш поширеними є Bellcore / Telcordia TR-NWT-332 та IEC6170 бази даних та статистичні моделі яких можуть застосовуватися для отримання значень ймовірності та інтенсивності відмов. Результати цих методик відрізняються одна від одною, тому що при обчисленнях вони використовують різні припущення та різні рівні впливів. Так, в MIL 217F HDBK використовується 100% навантаження, тоді як в методиці Bellcore / Telcordia тільки 50%. Втім, якщо два продукти мають аналогічні критерії ефективності та характеризуються різними значеннями MTBF і при розрахунках для визначення їх MTBF використовувалися однакові моделі та фактори навантаження, виріб з більш високим значенням MTBF і на практиці виявиться більш надійним. І це не залежить від обраної методології.

MTBF Calculator розраховує середній час напрацювання на відмову (MTBF) та інтенсивність відмов (FR) для електронних та точної механіки.

Користувач вибирає тип компонента, температуру, умови експлуатації, метод прогнозування, вводить параметри надійності та отримує середній час напрацювання між відмовами та інтенсивність відмов. У довіднику MIL-HDBK-217 для прогнозування надійності електронного обладнання використовуються дві моделі для оцінки  $\lambda$ : модель навантажень (stress-model) та оцінка елемента (parts count).

Виконаємо розрахунок за довідником MIL-HDBK-217F2 мікросхеми серії CD4046, що випускається за CMOS-технологією, експлуатується в бортовій РЕА в умовах відсіку транспортного літака (AIC), при температурі  $T_C = +48^\circ\text{C}$ .

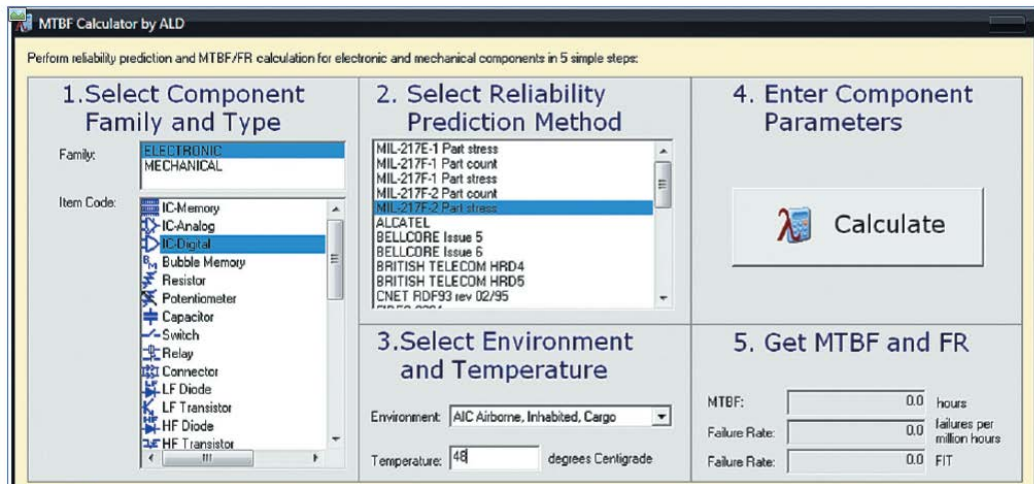


Рисунок 3. – Головне вікно програми MTBF Calculator фірми ALD

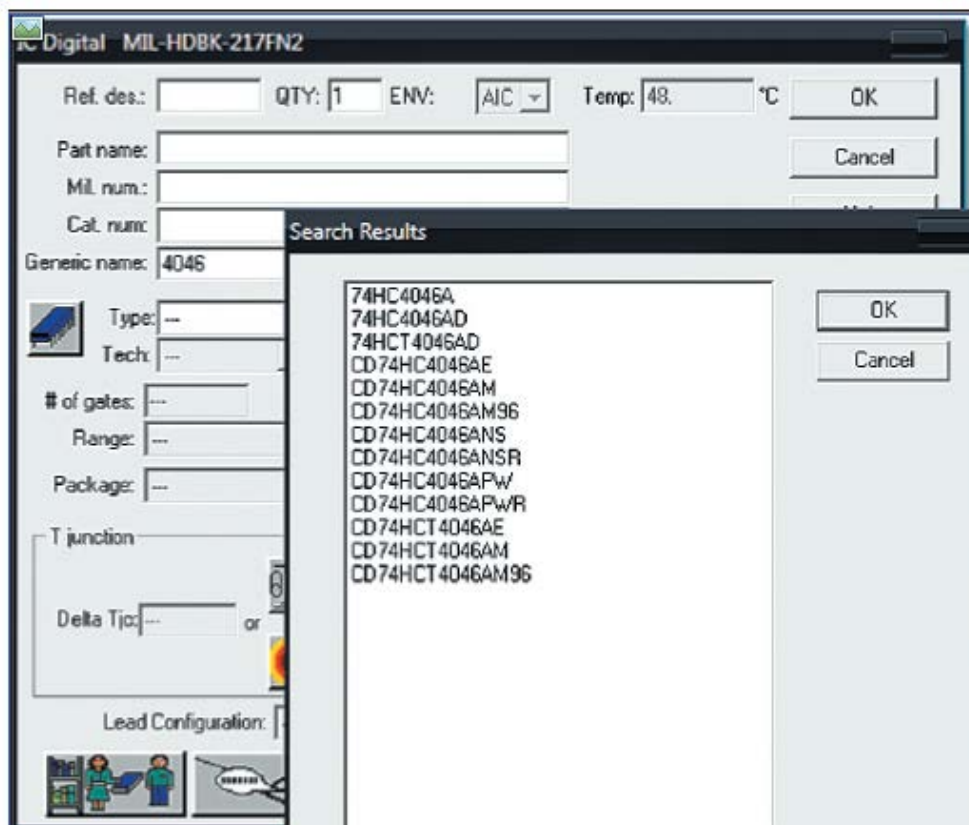


Рисунок 4. – Вибір ІС з довідника

На рис. 3 показано головне вікно програми MTBF Calculator фірми ALD. На першому кроці вибираємо тип компонента - IC, цифрові, що відносяться до сімейства електронних виробів. На другому кроці вибираємо метод передбачення характеристик надійності цього виробу. Проведемо оцінку надійності по MIL-HDBK-217F-2 (редакція 2) модель навантаження (Part Stress). Передбачається, що IC буде використовуватись у РЕА в умовах експлуатації жилого відсіку транспортного літака (коефіцієнт AIC) при температурі +48 ° С. Далі натискаємо на кнопку «Розрахунок» (Calculate) і відкривається вікно (рис. 4 і 5) для редагування довідкових даних. У поле Generic name вводимо серію 4046 і натискаємо на кнопку (рис. 5) для автоматичного пошуку за довідниками програми MTBF Calculator. Виберемо IC типу CD74HC4046APWR фірми Texas Instruments. IC випускаються в 16-вивідному корпусі типу TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package). Позначення SOP (Small-Outline Package) має такий же зміст, як і SOIC (Small-Outline Integrated Circuit), – корпус, призначений для поверхневого монтажу, має форму прямокутника з двома рядами виводів здовж довгих сторін, але відрізняється шириною. Серія 74HC4046A випускається також в корпусах PDIP, SOIC, SOP.

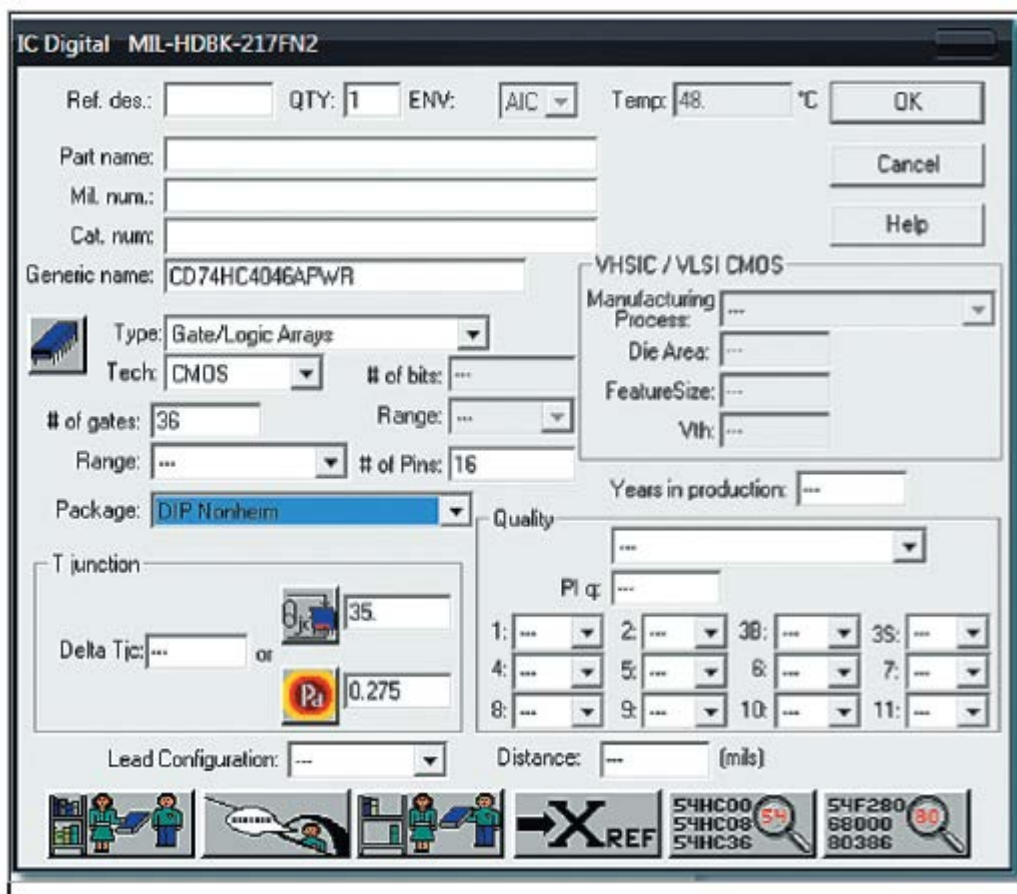


Рисунок 5. – Довідникові дані IC типу CD74HC4046APWR

На рис. 5 показані довідкові дані IC типу CD74HC4046APWR. Автоматично (з довідника програми MTBF Calculator) пропонується негерметичний 16-вивідних DIP-корпус, значення теплового опору перехід-

корпус  $\theta_{JC} = 35 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт}$ , потужність (динамічна), що розсіюється 275 мВт, 36 вентилів.

Результати розрахунків показані на рис. 6. Інтенсивність відмов становить 152 FIT.

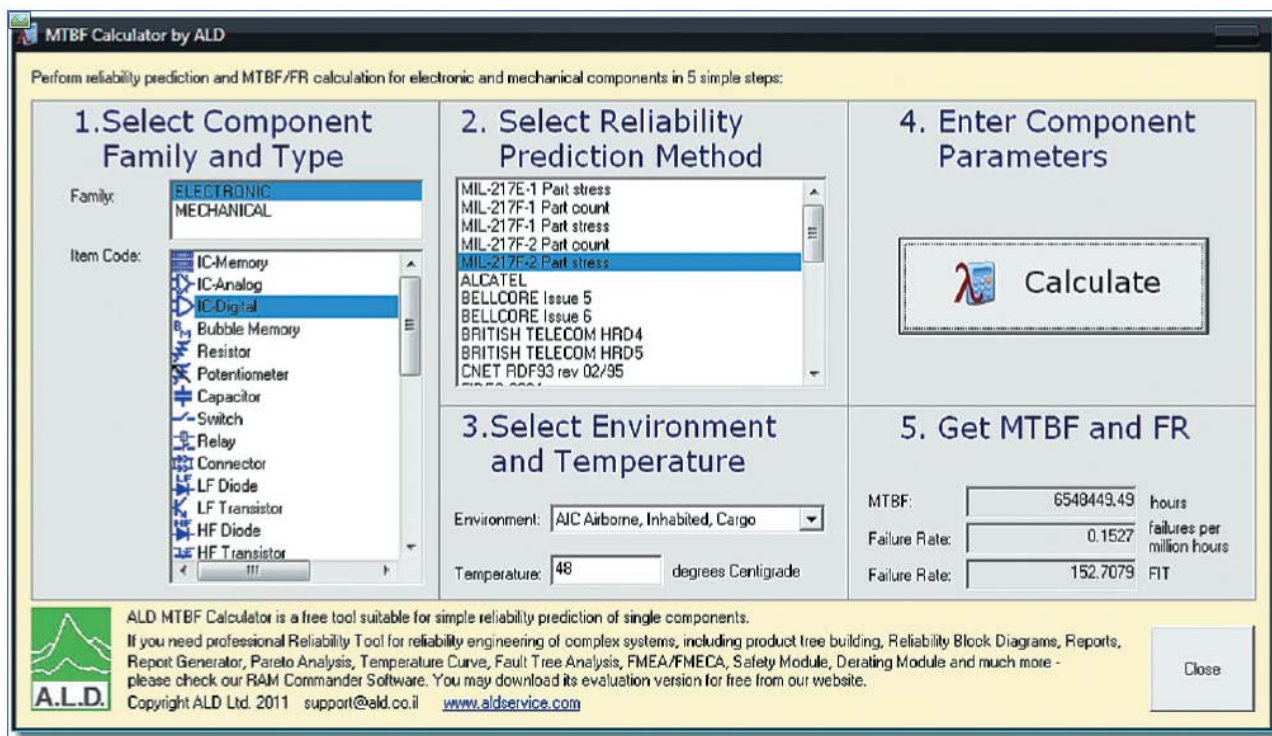


Рисунок 6. – Результати розрахунків надійності характеристик ІС типу CD74HC4046APWR (MTBF та FR)