

Abstract: Methods of an estimation of an average operating time to failure of products of electronic techniques (MTTF) are submitted on the basis of use DN-distribution for the various experimental and help data on reliability: failure rate, probability of failures, the minimal operating time, size FIT. It is marked, that prognosticative estimations MTTF on a basis exponential distribution are overestimated in comparison with similar estimations on the basis of DN-distribution.

Key words: failure, mean life, failure rate.

Аноація: Представлені методи оцінки середнього наробітку до відмови виробів електронної техніки (MTTF) на основі використання DN-розподілу для різних експериментальних та довідкових даних про надійність: інтенсивності відмов, імовірності відмов, мінімального наробітку, величини FIT. Відмічається, що прогнозовані оцінки MTTF на основі експоненціального розподілу суттєво завищені у порівнянні з аналогічними оцінками на підставі DN-розподілу

Ключові слова: відмова, середній ресурс, інтенсивність відмов.

Аноація: Представлены методики оценки средней наработки до отказа изделий электронной техники (MTTF) на основе использования DN -распределения для различных экспериментальных и справочных данных о надежности: интенсивности отказов, вероятности отказов, минимальной наработки, величины FIT. Отмечается, что прогнозные оценки MTTF на основе экспоненциального распределения существенно завышены по сравнению с аналогичными оценками на основе DN-распределения.

Ключевые слова: отказ, средний ресурс, интенсивность отказов.

1. Введение

Основной информацией, необходимой для расчета и проектирования надежности электронных систем, являются данные о надежности элементной базы. Современная элементная база – это изделия электронной техники (ИЭТ), т.е. интегральные схемы разной интеграции, а также дискретные приборы (полупроводниковые приборы, конденсаторы, резисторы и т.д.), – обладает достаточно высокой надежностью. Как свидетельствуют справочные и литературные данные, интенсивность отказов ИЭТ на моменты времени порядка 10000 ... 100000 ч. составляет порядка 10^{-9} ... 10^{-6} 1/ч. К сожалению, высокая надежность ИЭТ – важнейшее положительное качество, с другой стороны, ставит большие трудности для измерения собственной надежности ИЭТ. В частности, высокая надежность не позволяет получить достаточную статистику отказов, чтобы, используя традиционные статистические методы, оценить, например, среднюю наработку до отказа ИЭТ (Mean Time to Failure – MTTF) – характеристику, необходимую разработчикам технических систем.

Следует отметить, что современное состояние оценки надежности ИЭТ представляется явно неудовлетворительным. Ситуация такова, что измерение надежности ИЭТ сводится к оценке интенсивности отказов (вероятности отказов, вероятности безотказной работы) на интервале времени порядка 0 ... 20000 ч., что составляет сравнительно малую долю полной наработки ИЭТ. Используемый в данном приложении математический аппарат (экспоненциальное распределение) предполагает, что и в дальнейшем интенсивность отказов будет такой же. В связи с последним заметим, что результаты исследований эмпирических данных самых различных объектов, в том числе ИЭТ, свидетельствуют о том, что интенсивность отказов унимодальных распределений

всегда имеет возрастающий характер от начала и далее медианы распределения (50% отказов) и увеличивается примерно в 20...100 и более раз. Таким образом, прогноз средней наработки до отказа ИЭТ на основе экспоненциального закона представляется явно грубым и завышенным. Прогноз средней наработки до отказа ИЭТ на основе более адекватных двухпараметрических распределений, естественно, является точнее. Однако вследствие малой статистики, которая может привести к большим погрешностям оценки двух параметров, а также вследствие отсутствия аппарата расчета надежности систем на основе двухпараметрических распределений реальность использования в данном приложении двухпараметрических распределений до настоящего времени отсутствовала. Отметим, что развиваемый в данной работе математический аппарат вероятностно-физической теории надежности позволяет решать обе задачи, упомянутые в последнем предложении.

В настоящее время наиболее распространенным является определение среднего времени до отказа ИЭТ на основе использования экспоненциального закона. При этом надежность изделий электронной техники такова, что при испытаниях удается получить наработки, соответствующие экспериментальной вероятности отказов $F(t) = 0,0001...0,05$, и на основании этих результатов прогнозировать среднее время до отказа этих изделий. Таким образом [1], в настоящее время при использовании экспоненциального закона завышается математическое ожидание времени до отказа изделий электронной техники в 50-500 раз по сравнению со значением этой же характеристики, вытекающей из двухпараметрических моделей, более адекватно описывающих статистику отказов. В будущем ожидается еще большее расхождение в оценках математического ожидания до отказа изделий электронной техники на основе экспоненциального распределения в связи с повышением надежности последних.

Распространенные показатели безотказности ИЭТ в виде интенсивностей отказов могут быть использованы при расчете надежности систем только на основе экспоненциального распределения. Установлено [2,3,4], что расчет надежности систем на основе экспоненциального распределения (лямбда-метода) приводит к огромной методической погрешности – к занижению оценки средней наработки до отказа системы в \sqrt{n} раз, где n – число элементов в последовательной системе.

Для того, чтобы рассчитывать и прогнозировать надежность проектируемых технических систем на основе более адекватных двухпараметрических функций распределения наработки, необходимо знать более полные показатели надежности составляющих элементов. В частности, полной информацией о надежности элементов является знание средней наработки до отказа (MTTF) и коэффициента вариации этой наработки.

В справочной литературе приводятся разные данные о надежности элементов (как правило, неполные данные). В частности, интенсивность отказов без указания наработки t_n , при которой она определялась; число поставленных на испытание элементов N и число отказавших r за время испытаний t_r ; минимальная наработка, соответствующая определенной вероятности отсутствия отказа γ ; интенсивность отказов, соответствующая известной вероятности отказов

$(F = \frac{r}{N})$. В последние годы (в основном за рубежом) используют единицы, именуемые FIT (Failure in 10^9 component hours или один отказ на 10^9 часов наработки).

В настоящей работе приводятся ряд методик, которые позволяют в зависимости от имеющейся информации определить значение средней наработки до отказа (ресурса) изделий электронной техники. В данном случае принимается гипотеза о том, что коэффициент вариации наработки до отказа элементов равен единице. Уточнение коэффициента вариации не вызывает каких-либо затруднений для определения среднего ресурса по предлагаемым методикам.

2. Оценка средней наработки до отказа элементов на основании результатов испытаний или эксплуатации (сильно цензурированная выборка) при наличии единичных отказов

Допустим, на испытание поставлено N элементов (в электронной системе типа ЭВМ задействовано N элементов определенного типа). В результате испытания (эксплуатации) за t_r отказало r элементов. Полагая, что распределение времени до отказа описывается DN -распределением (для $\nu = 1$), можно получить выражение для оценки средней наработки до отказа, используя метод квантилей. Выражение для вероятности r -го отказа имеет вид

$$\Phi\left(\frac{t_r - T_0}{\sqrt{t_r T_0}}\right) + \exp(2) \Phi\left(-\frac{t_r + T_0}{\sqrt{t_r T_0}}\right) = \frac{r}{N}, \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция нормированного нормального распределения.

Точечную оценку средней наработки до отказа \tilde{T}_0 элементов ($MTTF$) вычисляют по формуле

$$\tilde{T}_0 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{t_i}{x(i/N; \nu)}, \quad (2)$$

где $x(i/N; \nu) = \frac{t_i}{T_0}$ – относительная наработка определяется по значению $F_i = i/N$ и

коэффициента вариации ν из соответствующих таблиц DN -распределения или путем решения уравнения (1).

Поскольку функция DN -распределения табулирована [4-7], можно очень просто решить данную задачу.

Пример. На испытание поставлено 2000 элементов типа ИС. В течение 50000 ч. отказало три штуки ИС: $t_1 = 25000$ ч.; $t_2 = 40000$ ч.; $t_3 = 50000$ ч.

Необходимо определить ожидаемое среднее значение наработки до отказа T_0 (MTTF).

Решение. Вычисляем экспериментальную вероятность, соответствующую первому отказу:

$F_1 = \frac{1}{N} = \frac{1}{2000} = 0,0005$. По значению $F_1 = 0,0005$ (например, в табл. А.4 Приложения А [5]) находим

$x_1 = \frac{t_1}{T_0} = 0,0705$. Аналогично находим $F_2 = 0,001$; $x_2 = 0,078$; $F_3 = 0,0015$; $x_3 = 0,0832$.

Подставляем найденные значения в последнее выражение (2) и определяем оценку $MTTF$:

$$\tilde{T}_0 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{t_i}{x(i/N; \nu)} = \frac{1}{3} \left(\frac{25000}{0,0705} + \frac{40000}{0,078} + \frac{50000}{0,0832} \right) = 489464 \text{ ч.}$$

3. Оценка средней наработки до отказа элементов на основании результатов испытаний или эксплуатации (сильно цензурированная выборка) при отсутствии отказов

Допустим, как в предыдущем случае, на испытание поставлено (или находятся под наблюдением) N элементов определенного типа. В результате испытания (эксплуатации) на момент контроля (цензурирования) t_u не было зафиксировано ни одного отказа.

Вычисляют нижнюю границу вероятности отсутствия отказа испытываемых (эксплуатируемых) элементов за интервал испытаний (эксплуатации) t_u по формуле [8]:

$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2} \right)^{1/N}, \quad (3)$$

где q – доверительная вероятность оценки искомого параметра T_0 (MTTF), соответствующая двустороннему доверительному интервалу.

Вычисляют нижнюю доверительную границу параметра \underline{T}_0 для рассматриваемой схемы испытаний (эксплуатации), решая уравнение

$$\underline{P}(t_u) = \Phi \left(\frac{\underline{T}_0 - t_u}{\sqrt{\underline{T}_0 t_u}} \right) - \exp(2) \Phi \left(-\frac{\underline{T}_0 + t_u}{\sqrt{\underline{T}_0 t_u}} \right). \quad (4)$$

При установленном значении $\underline{P}(t_u)$ из последнего уравнения получают решение (оценку нижней доверительной границы параметра \underline{T}_0) в следующем виде:

$$\underline{T}_0 = \frac{t_u}{x[1 - \underline{P}(t_u); 1]} = t_u K_1(\underline{P}, 1), \quad (5)$$

где $K_1(\underline{P}, 1)$ – поправочный коэффициент, учитывающий эмпирическую вероятность отсутствия отказа; $x[1 - \underline{P}(t_u); 1]$ – относительная наработка $\left(x = \frac{t_u}{\underline{T}_0} \right)$ определяется из таблиц функции DN -распределения по значениям $F = 1 - \underline{P}(t_u)$ и $\nu = 1$ или при решении уравнения

$$F = \Phi \left(\frac{x-1}{\sqrt{x}} \right) + \exp(2) \Phi \left(-\frac{1+x}{\sqrt{x}} \right). \quad (6)$$

Используя оценку \underline{T}_0 , соответствующую доверительной вероятности q , определяют точечную оценку параметра \tilde{T}_0 , решая следующее уравнение относительно \tilde{T}_0 :

$$\Phi\left(\frac{\tilde{T}_0 - \underline{T}_0}{\sqrt{\tilde{T}_0 \underline{T}_0}}\right) - \exp(2) \cdot \Phi\left(-\frac{\tilde{T}_0 + \underline{T}_0}{\sqrt{\tilde{T}_0 \underline{T}_0}}\right) = q. \quad (7)$$

Решением уравнения (7) относительно \tilde{T}_0 является следующее выражение:

$$\tilde{T}_0 = \frac{\underline{T}_0}{x(1-q; 1)} = \underline{T}_0 K_2(q, 1), \quad (8)$$

где $K_2(q, 1)$ – поправочный коэффициент, учитывающий распределение наработки. Таким образом, точечная оценка параметра T_0 имеет вид

$$\tilde{T}_0 = t_u K_1(\underline{P}, 1) K_2(q, 1). \quad (9)$$

Пример. На испытание поставлено 2000 элементов типа ИС. В течение $t_u = 20000$ ч. не было ни одного отказа. Необходимо определить ожидаемое среднее значение наработки до отказа T_0 (МТТФ).

Решение.

1. Вычисляем нижнюю доверительную границу вероятности отсутствия отказа для $q = 0,6$

$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N} = \left(\frac{1-0,6}{2}\right)^{1/2000} = 0,9992.$$

2. Используя, например, таблицу А.4 Приложения А [5], определяем $x(1-\underline{P}, 1) = x(0,0008, 1) = 0,076$ и далее вычисляем коэффициент $K_1(\underline{P}, 1) = \frac{1}{0,076} = 13,2$.

3. По аналогии с предыдущим пунктом определяем второй коэффициент:

$$x(1-q, 1) = x(0,4; 1) = 0,54; \quad K_2(q, 1) = \frac{1}{0,54} = 1,85.$$

4. Подставляем найденные значения в выражение (9) и определяем оценку МТТФ:

$$\tilde{T}_0 = t_u K_1(\underline{P}, 1) K_2(q, 1) = 20000 \cdot 13,2 \cdot 1,85 = 488400 \text{ ч.}$$

4. Определение средней наработки до отказа элементов по справочному значению интенсивности отказов этого элемента

Для того, чтобы получить оценку средней наработки до отказа элемента по значению интенсивности отказов этого элемента, необходимо знать t_n – время (наработку), при котором определялось данное значение интенсивности отказов λ_{t_n} . Далее, исправив значение

интенсивности отказов с помощью рекомендуемых коэффициентов пересчета в соответствующие условия применения, среднюю наработку до отказа элемента определяют, решая уравнение

$$\ln \lambda_{t_n} = \frac{1}{2} \left[\ln T_0 - \ln(2\pi t_n^3) - \frac{(t_n - T_0)^2}{t_n T_0} \right], \quad (10)$$

где T_0 – искомая средняя наработка до отказа элемента. Решения последнего уравнения для рекомендуемых рядов значений t_n и λ_{t_n} приведены в [4, 5, 7] в виде таблиц или графиков.

Выражение (10) получено из следующих соображений. Интенсивность отказов, если принять в качестве теоретической модели распределения наработки до отказа элементов (изделий электронной техники) DN -распределение с коэффициентом вариации наработки $\nu = 1$, имеет следующее выражение:

$$\lambda_{t_n} = \frac{f(t_n)}{R(t_n)}, \quad (11)$$

$$\text{где } f(t_n) = \frac{\sqrt{T_0}}{t_n \sqrt{2\pi t_n}} \exp\left[-\frac{(t_n - T_0)^2}{2 T_0 t_n}\right]; \quad R(t_n) = \Phi\left(\frac{T_0 - t_n}{\sqrt{T_0 t_n}}\right) - \exp(2) \cdot \Phi\left(-\frac{t_n + T_0}{\sqrt{T_0 t_n}}\right).$$

При экспериментальной оценке интенсивности отказов высоконадежных изделий электронной техники, как известно, процент отказавших изделий не превышает 1...5%. В таком случае значение интенсивности отказов практически совпадает со значением плотности вероятностей отказов, т.е. можно принять $\lambda_{t_n} \approx f(t_n)$. Таким образом, можно записать

$$\lambda_{t_n} \cong \frac{\sqrt{T_0}}{t_n \sqrt{2\pi t_n}} \exp\left[-\frac{(t_n - T_0)^2}{2 T_0 t_n}\right]. \quad (12)$$

Прологарифмировав последнее выражение, получают соотношение (10) для оценки средней наработки до отказа элементов.

Пример. В справочной литературе имеются следующие данные для некоторой интегральной схемы:

$\lambda_{t_n}^c = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$; $t_n = 10^4 \text{ ч}$; $K_3 = 0,5$. Здесь обозначено: $\lambda_{t_n}^c$ – справочное значение интенсивности отказов; K_3 – принятый коэффициент эксплуатации.

Необходимо определить среднюю наработку до отказа этой интегральной схемы T_0 .

Решение 1. Вычисляем $\lambda_{t_n} = \lambda_{t_n}^c \cdot K_3 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$. Подставляем значения λ_{t_n} и t_n в уравнение (10) и, решая его, находим $T_0 \approx 180000 \text{ ч}$.

Решение 2. Входим в таблицу А.4 Приложения А [5] по значениям $t_H = 10000$ ч. и $\lambda(t_H) = 5 \cdot 10^{-8}$ 1/ч. и определяем $T_0 = t \cong 183000$ ч.

5. Оценка средней наработки до отказа (ресурса) элементов по справочному значению минимальной наработки

В некоторых НТД на изделия электронной техники приводится значение минимальной наработки T_{\min} , гарантированной с вероятностью γ .

Выражение для средней наработки до отказа как функции от минимальной наработки для DN -распределения имеет вид

$$T_0 = \frac{T_{\min}}{x(1-\gamma; \nu)}, \quad (13)$$

где величину $x(1-\gamma; \nu)$ определяют по значениям $F = 1-\gamma$ и $\nu = 1$ из соответствующих таблиц DN -распределения или решая следующее уравнение:

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

Например, используя таблицу А.4 Приложения А [5], определяем: для $\gamma = 0,99$ $T_0 = 8,4 \cdot T_{\min}$, а для $\gamma = 0,999$ $T_0 = 12,8 \cdot T_{\min}$.

6. Оценка средней наработки до отказа (ресурса) элементов по справочным данным об экспериментальной вероятности и интенсивности отказов

По справочному значению экспериментальной вероятности отказов $\left(F^{\varnothing} = \frac{r}{N}\right)$ и значению экспериментальной интенсивности отказов λ вычисляют значение средней наработки до отказа (ресурса) элементов по следующей формуле:

$$T_0 = -\frac{\ln(1-F^{\varnothing})}{\lambda \cdot x(F^{\varnothing}, 1)}, \quad (14)$$

где значение относительной наработки $x = x(F^{\varnothing}, 1) = \frac{t_H}{T_0}$ определяют из соответствующих таблиц DN -распределения по значениям $F = F^{\varnothing}$ и коэффициента вариации $\nu = 1$.

Пример. В справочной литературе имеются следующие данные для ИС. Поставлено на испытание (находится под наблюдением при эксплуатации) N элементов одного типа. Отказало за время испытаний (эксплуатации) r элементов: $F^{\varnothing} = \frac{r}{N} = \frac{7}{1400} = 0,005$; $\lambda = 10^{-7}$ 1/час.

Необходимо определить среднее значение ресурса ИС (MTTF) T_0 .

Решение. По значению $F = 0,005$ в таблице А.4 Приложения А [5] определяем $x = 0,104$. Используя формулу (14), вычисляем значение средней наработки (ресурса) ИС:

$$T_0 = -\frac{\ln 0,995}{10^{-7} \cdot 0,104} = \frac{0,005 \cdot 10^7}{0,104} = 480770 \text{ час.}$$

7. Оценка средней наработки до отказа элементов по значению уровня безотказности элемента, выраженного в FIT-ах

В зарубежной литературе [10–12] в качестве характеристики надежности часто используют величину FIT (*Failure in Time*) – число отказов за приведенное полное время испытаний EDH (*Equivalent Device Hours*).

EDH представляет собой произведение числа образцов N на время испытаний H и на коэффициент ускорения A_t : $EDH = NHA_t$.

Нетрадиционный показатель надежности получают, умножая экспериментальную интенсивность отказов $\lambda^* = \frac{r}{EDH}$ на число 10^9 :

$$FIT = \frac{r \cdot 10^9}{EDH},$$

где r – число зарегистрированных отказов.

Множитель 10^9 введен, чтобы иметь целочисленный показатель, который может давать простые сравнительные оценки надежности и качества продукции и в какой-то мере гарантии фирмы на установленный ресурс изделий электронной техники. Для современных технологий значение FIT имеет значения в пределах 0 – 9. Если $FIT \gg 10$, то это свидетельствует о недостаточной информации, полученной при испытаниях (малое время испытаний, малый объем выборки образцов, большое число отказов), и в этом случае прогноз надежности теряет смысл.

Установим связь традиционного показателя надежности MTTF с новым показателем FIT, представляющим собой аналог интенсивности отказов, поскольку его размерность (число образцов)/(время).

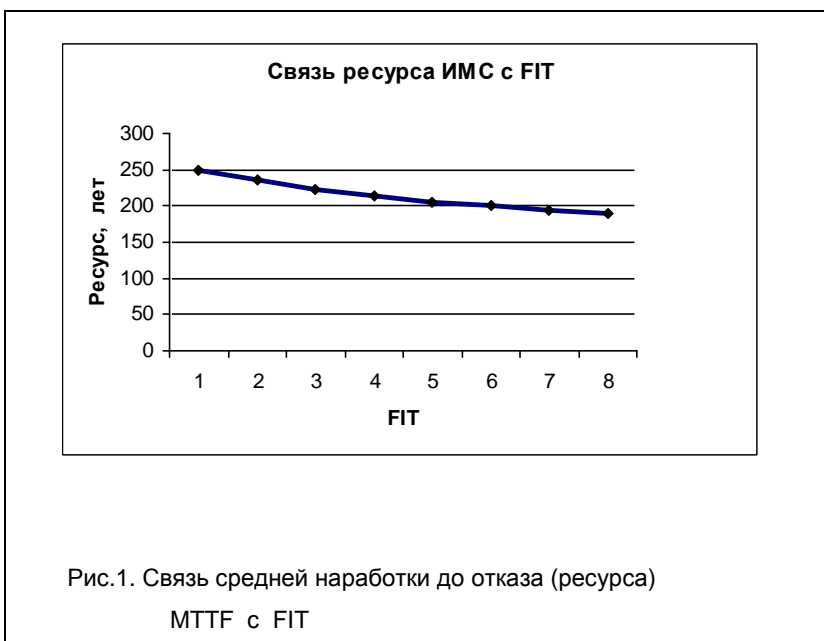
В работе [12] в табл. 4 приведены результаты испытаний интегральных микросхем (ИМС) фирмы Analog-Devices для ИМС различных технологий, дан прогноз среднего ресурса MTTF этих ИМС на основе экспоненциального распределения и установлены FIT ИМС. Ниже, используя приведенные результаты испытаний, получены оценки MTTF на основе DN -распределения, используя выше приведенные методики. При расчетах принята доверительная вероятность оценки показателей надежности $q = 0,6$. В таблице сведены результаты прогноза среднего ресурса ИМС на основе экспоненциального распределения ($MTTF(E)$) и на основе DN -распределения ($MTTF(DN)$).

Таблица 1. Оценки среднего ресурса ИМС

№ п/п	Технология ИМС	Число образцов, N	Число отказов, r	FIT	MTTF(E), лет	MTTF(DN), лет	$\frac{MTTF(E)}{MTTF(DN)}$
1	Bipolar $> 2.5 \mu m^2$	12425	0	1	130000	250	520
2	Bipolar $< 2.5 \mu m^2$	9699	1	2	65000	235	270
3	CMOS 0.8-2.0 μm^{**}	3305	0	3	42000	223	190
4		16516	5	4	27000	213	130
5	CMOS 0.6 μm	26980	12	5	22000	205	110
6	BiCMOS	6754	3	6	18000	200	95
7	CMOS 0.5 μm	3906	2	7	16000	195	85
8	CMOS 0.25 μm CMOS 0.18 μm	878	0	8	14000	190	70

Примечания: * – площадь эмиттерного перехода; ** – ширина затвора.

В последнем столбце таблицы приведены отношения оценок среднего ресурса ИМС по экспоненциальному распределению MTTF(E) к оценкам среднего ресурса ИМС на основе DN - распределения MTTF(DN). Как видно, прогноз ресурса ИМС на основе экспоненциального распределения завышен по сравнению с более адекватным прогнозом на основе DN - распределения в 70 – 520 раз. Таким образом, ожидаемый средний ресурс ИМС, например, фирмы ADI [11], соответствующий 5–6 FIT, составляет порядка 200, а не 20000 лет, как считают исследователи, использующие для расчета ресурса экспоненциальное распределение. Ниже приводится графическая связь между значениями ожидаемого среднего ресурса и величины FIT исследованных выше ИМС.



Пример. В [12] показано, что ИМС типа BiCMOS имеет показатель надежности FIT=5. Значение величины FIT было установлено на основании испытаний $N = 26980$ образцов, при этом произведение (ИМС) × (час), то есть $EDH = 2763317240$ час.

Необходимо вычислить среднюю наработку до отказа T_0 (MTTF) этой ИМС.

Решение.

1. Вычисляем экспериментальную интенсивность отказов: $\tilde{\lambda} = \frac{FIT}{10^9} = 5 \cdot 10^{-9} 1/ч$.

2. Вычисляем усредненное время испытаний каждого образца: $\tilde{t}_H = \frac{EDH}{N} = 102420 \text{ ч}$.

3. Используя соответствующие таблицы [5] или подставляя значения $\tilde{\lambda}$ и \tilde{t}_H в формулы (11)-(12), определяем: $T_0 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ час} \cong 205 \text{ лет}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Сов.радио, 1962. – 252 с.
2. Надежность и эффективность АСУ / Заренин Ю.Г, Збырко М.Д., Креденцер Б.П. и др. – К.: Техніка, 1975. – 368 с.
3. Соловьев А.Д. Основы математической теории надежности. – М.: Знание, 1975. – 103 с.
4. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
5. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
6. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования.- Введ.01.01.1996. – 39 с.
7. ДСТУ 2992-95. Изделия электронной техники. Методы расчета надежности. – Введ.01.01.1996.– К.: Изд-во стандартов. – 76 с.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Под ред. В.С. Авдеевского и др. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 6. – 376 с.
9. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.1999. – К.: Изд-во стандартов. – 43 с.
10. Reliability and Quality Report. Fourth Quarter 1996. – Motorola, Inc., 1996. – P. 64 – 69.
11. Гусев А., Лидский Э., Мироненко О. Малые выборки при оценке работоспособности и надежности электронных компонентов // Chip News. – 2002. – № 1. – С. 52 – 55.
12. Романов В. Количественная оценка надежности интегральных микросхем по результатам форсированных испытаний // ЭКис. – 2003. – № 10. – С. 3 – 6.