



УДК 621.3.019.3

А.В. ФЕДУХИН*, В.П. СТРЕЛЬНИКОВ*, Н.В. СЕСПЕДЕС ГАРСИЯ*, Ар.А. МУХА*

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЭТАПЕ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Стаття присвячена розробці наближених оцінок середнього напрацювання на відмову і середнього терміну служби відновлюваних виробів у рамках гіпотези про дифузійний закон розподілу (DN -розподіл). На етапі ескізного проектування виникає необхідність орієнтовної оцінки кількісних показників надійності нового виробу. При використанні традиційного і морально застарілого математичного апарату на основі експоненціального розподілу показники безвідмовності невідновлюваного і відновлюваного виробів у вигляді середнього напрацювання до відмови і середнього напрацювання на відмову ідентичні. Крім того, в рамках гіпотези про експоненціальний закон розподілу відсутня залежність середнього напрацювання на відмову від часу експлуатації, що не відповідає дійсності, а також у рамках цієї моделі на сьогоднішній день немає розрахункової оцінки довговічності (терміну служби) відновлюваного виробу. Більш достовірні оцінки надійності можна отримати в рамках імовірно-фізичного підходу до теорії надійності, заснованого на використанні більш адекватних двопараметричних розподілів (DM і DN -розподілів), проте і в рамках цих моделей точні розрахунки показників надійності, на основі аналітичної залежності для параметра потоку відмов базуються на вихідних даних про надійність елементів і складових частин виробу, яких також, як правило, немає на етапі ескізного проектування. Тому на ранніх етапах проектування для практичних розрахунків доцільно використовувати наближені (феноменологічні) вираження, які не потребують використання докладної інформації про номенклатуру елементів і складових частин виробу і їх характеристики надійності, що дозволяють отримати хоча б наближені оцінки надійності при збереженні прийнятної на даному етапі проектування точності. В роботі отримані наближені вирази для оцінки середнього напрацювання на відмову і середнього терміну служби відновлюваних виробів, які не потребують використання повної інформації про номенклатуру та характеристики.

Ключові слова: ескізне проектування, наближена оцінка, феноменологічна модель, коефіцієнт зниження напрацювання.

Аннотация. Статья посвящена разработке приближенных оценок средней наработки на отказ и среднего срока службы восстанавливаемых изделий в рамках гипотезы о диффузионном законе распределения (DN -распределение). На этапе эскизного проектирования возникает необходимость ориентировочной оценки количественных показателей надежности нового изделия. При использовании традиционного и морально устаревшего математического аппарата на основе экспоненциального распределения показатели безотказности невосстанавливаемого и восстанавливаемого изделий в виде средней наработки до отказа и средней наработки на отказ идентичны. Кроме того, в рамках гипотезы об экспоненциальном законе распределения отсутствует зависимость средней наработки на отказ от времени эксплуатации, что не соответствует действительности, а также в рамках этой модели на сегодняшний день не имеется расчетной оценки долговечности (срока службы) восстанавливаемого изделия. Более достоверные оценки надежности можно получить в рамках вероятностно-физического подхода к теории надежности, основанного на использовании более адекватных двухпараметрических распределений (DM и DN -распределений), однако и в рамках этих моделей точные расчеты показателей надежности на основе аналитической зависимости для параметра потока отказов базируются на исходных данных о надежности элементов и составных частей изделия, которых также, как правило, не имеется на этапе эскизного проектирования. Поэтому на ранних этапах проектирования для прак-

тических расчетов целесообразно использовать приближенные (феноменологические) выражения, не требующие использования подробной информации о номенклатуре элементов и составных частей изделия и их характеристиках надежности, позволяющие получить хотя бы приближенные оценки надежности при сохранении приемлемой на данном этапе проектирования точности. В работе получены приближенные выражения для оценки средней наработки на отказ и среднего срока службы восстанавливаемых изделий, не требующие использования полной информации о номенклатуре и характеристиках надежности элементов и составных частей, входящих в состав изделия.

Ключевые слова: эскизное проектирование, приближенная оценка, феноменологическая модель, коэффициент снижения наработки.

Abstract. The article is devoted to the development of approximate estimates of the mean time between failures and the average service life of the recovered products within the hypothesis of the diffusion distribution law (DN-distribution). At the stage of preliminary design, the need arises for an approximate estimate of the quantitative indicators of the reliability of a new product. Using a traditional and obsolete mathematical apparatus based on exponential distribution, the indices of failure-free operation of non-recoverable and recoverable products in the form of an average operating time to failure and the mean time between failures are identical. In addition, within the hypothesis of the exponential distribution law, there is no dependence of the mean time to failure on the time of operation, which is not true, and also in the framework of this model there is currently no educated estimate of the durability of the product to be restored. More reliable estimates of reliability can be obtained within the framework of the probabilistic-physical approach to reliability theory based on the use of more adequate two-parameter distributions (DM and DN-distributions), but within these models, accurate calculations of reliability indicators, based on the analytical dependence for the failure flow parameter, are based on the initial data on the reliability of the elements and component parts of the product, which also, as a rule, is not available at the stage of preliminary design. Therefore, in the early stages of designing, it is advisable to use approximate (phenomenological) expressions for practical calculations that do not require the use of detailed information on the nomenclature of the elements and the component parts of the product and their reliability characteristics, allowing at least approximate reliability estimates, while maintaining an acceptable, at this stage of design, accuracy. Approximate expressions for estimating the mean time between failures and the average service life of the recovered products are obtained in this paper. They do not require the use of complete information on the nomenclature and reliability characteristics of the elements and constituent parts that make up the product.

Keywords: sketch design, approximate estimation, phenomenological model, reduction factor of operating time.

1. Введение

На этапе эскизного проектирования возникает необходимость ориентировочной оценки количественных показателей надежности нового изделия с целью включения этих данных в разрабатываемое совместно с заказчиком проекта техническое задание (ТЗ).

При использовании традиционного и морально устаревшего математического аппарата на основе экспоненциального распределения показатели безотказности невозстанавливаемого и восстанавливаемого изделий в виде средней наработки до отказа (T_1) и средней наработки на отказ (T_2) идентичны, то есть $T_1 = T_2$. Кроме того, в рамках гипотезы об экспоненциальном законе распределения предполагается отсутствие зависимости T_2 от времени эксплуатации, что не соответствует действительности [1, 2], а также в рамках этой модели на сегодняшний день не имеется расчетной оценки долговечности (срока службы) ($T_{ср}$) восстанавливаемого изделия.

Более достоверные оценки надежности можно получить в рамках вероятностно-физического подхода к теории надежности, основанного на использовании более адекватного двухпараметрического распределения (DN-распределения) [1], однако и в рамках этой модели точные расчеты показателей надежности базируются на исходных данных о

надежности элементов и составных частей изделия, которых также, как правило, не имеется на этапе эскизного проектирования. Поэтому на ранних этапах проектирования, а именно на этапе эскизного проекта и формирования концепции разработки для практических расчетов целесообразно использовать приближенные (феноменологические) выражения, не требующие использования подробной информации о номенклатуре элементов и составных частей изделий и их характеристиках надежности.

Целью исследований является разработка приближенных оценок средней наработки на отказ и среднего срока службы восстанавливаемых изделий в рамках гипотезы о диффузионном законе распределения (*DN*-распределении).

2. Приближенная оценка средней наработки на отказ и среднего срока службы при известных параметрах надежности элементов и составных частей изделия

Точная оценка средней наработки на отказ $T_2(t_n)$, полученная из аналитической зависимости для параметра потока отказов, приведена в [1]. На этапе эскизного проектирования и формирования концепции изделия, как правило, не имеется полных данных о надежности комплектующих элементов и составных частей. Поэтому на этом этапе целесообразно использовать упрощенные феноменологические модели, позволяющие получить хотя бы приближенные оценки надежности при сохранении приемлемой, на данном этапе проектирования, точности и общих тенденций поведения этих показателей надежности изделия в процессе эксплуатации.

Приближенная оценка для $T_2(t_n)$ [1, 2] выглядит следующим образом:

$$T_2(t_n) = T_y + (T_1 - T_y) \exp \left[\frac{t_n - T_1}{T_{кр} - T_1} \ln(T_1 - T_y)^{-1} \right], \quad (1)$$

где t_n – суммарная наработка изделия в процессе эксплуатации.

Средняя наработка до отказа изделия:

$$T_1 = \left(\sum_{i=1}^N n_i T_{oi}^{-2} \right)^{-1/2}, \quad (2)$$

где T_{oi} – средняя наработка до отказа i -го типа элементов, входящих в состав изделия;

n_i – количество i -го типа элементов;

N – количество типов элементов, входящих в состав изделия.

Установившееся значение средней наработки на отказ изделия:

$$T_y = \left(\sum_{i=1}^N n_i T_{oi}^{-1} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Параметр, характеризующий надежность и количество наиболее критичных элементов изделия, формирующих основной поток отказов:

$$T_{кр} = \min \left\{ \frac{T_{oi}}{n_i} \right\} \cdot n_i / \pi. \quad (4)$$

Долговечность (срок службы) изделий – это свойство сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе обслуживания и ремонта. Предельное состояние изделия может характеризоваться:

- переходом восстанавливаемого изделия в неработоспособное и неремонтируемое состояние;

- снижением эффективности использования изделия вследствие ухудшения надежности;
- снижением экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации изделия;
- моральным старением изделия.

Основным нормируемым показателем долговечности восстанавливаемых объектов является средний срок службы T_{cl} . В качестве критерия наступления предельного состояния восстанавливаемого изделия предлагается использовать явление снижения средней наработки на отказ $T_2(t_n)$ (2) до минимально допустимого уровня $T_{дон}$. Минимально допустимый уровень средней наработки на отказ $T_{дон}$, удовлетворяющий требованиям эксплуатации, устанавливается по согласованию с заказчиком.

Исходными данными для расчета долговечности (срока службы) восстанавливаемых изделий являются:

- номенклатура составных частей;
- показатели безотказности составных частей;
- структурная схема надежности изделия (ССН);
- минимально допустимое значение средней наработки до отказа ($T_{дон}$) изделия.

Расчет среднего срока службы восстанавливаемого изделия, при установленной $T_{дон}$, производят по формуле [1]

$$T_{cl} = \frac{1}{8760 \cdot K_{из}} \left\{ T_1 + \frac{(T_{кр} - T_1) \cdot \ln \left(\frac{T_{дон} - T_y}{T_1 - T_y} \right)}{\ln \left(\frac{T_y}{T_1 - T_y} \right)} \right\} \text{ (лет)}, \quad (5)$$

где $K_{из}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации (отношение времени включенного состояния изделия к календарному времени эксплуатации).

Оценку показателей безотказности изделия производят в следующем порядке. Сначала выделяют избыточные составляющие части изделия и вычисляют их среднюю наработку до отказа T_{1j} (2) на основе данных о надежности элементов. После этого изделие рассматривается как объект с последовательной структурой, включающей все составные части ($j = 1, 2, \dots, K$) (аналогично формулам (2–4)). Вычисляют среднюю наработку до отказа изделия по формуле

$$T_1 = \left(\sum_{j=1}^K n_j T_{1j}^{-2} \right)^{-1/2}, \quad (6)$$

где n_j – число составных частей j -го типа, K – число составных частей, объединенных в последовательную структуру, T_{1j} – средняя наработка до отказа составных частей j -го типа.

Примечание 1. Для неизбыточных составных частей T_{1j} равна средней наработке до отказа составной части (2), а для избыточных составных частей T_{1j} вычисляется в соответствии с их ССН [1].

Далее вычисляют значение установившейся (асимптотической) средней наработки на отказ изделия по формуле

$$T_y = \left(\sum_{j=1}^K n_j T_{1j}^{-1} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Значение средней наработки до отказа критических составных частей ($T_{кр}$), дающих наибольшую долю отказов за срок службы, определяют следующим образом:

$$T_{кр} = \min \left\{ \frac{T_{1j}}{n_j} \right\} \cdot n_j / \pi. \quad (8)$$

3. Приближенная оценка средней наработки до отказа и среднего срока службы при неизвестных параметрах надежности элементов и составных частей изделия

Если имеется лишь общее ориентировочное значение средней наработки до отказа изделия T_1 , то на основе анализа результатов многочисленных расчетов надежности различных изделий с использованием DN – распределения предлагается использовать эмпирическую зависимость:

$$T_y = 0,05 \cdot T_1. \quad (9)$$

Кроме того, исследованиями установлено, что основной поток отказов современной сложной электронной аппаратуры формируют такие элементы, как пайки, межслойные соединения многослойных печатных плат, точки ультразвуковой сварки и контакты разъёмных соединений. Поэтому для вычисления $T_{кр}$ используем значение средней наработки до отказа элементов типа «контакт» $T_0 = 16 \cdot 10^5$ ч [1]. Откуда

$$T_{кр} = \frac{T_0}{\pi} = 5 \cdot 10^5 \text{ ч}. \quad (10)$$

После подстановки в (1) выражений (9) и (10) получим дополнительную формулу для приближенной оценки величины средней наработки на отказ изделия в зависимости от времени его функционирования [3]:

$$T_2(t_n) = T_1 \left\{ 0,05 + 0,95 \exp \left[\frac{(t_n - T_1)}{(5 \cdot 10^5 - T_1)} \cdot \{\ln(0,95T_1)\}^{-1} \right] \right\}. \quad (11)$$

Пример 1. Рассчитать среднюю наработку на отказ изделия для случая:

$$T_{11} = 1 \cdot 10^5 \text{ ч}; n_1 = 20 \text{ шт.};$$

$$T_{12} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ ч}; n_2 = 30 \text{ шт.};$$

$$T_{13} = 5 \cdot 10^5 \text{ ч}; n_3 = 50 \text{ шт.};$$

$T_{14} = 16 \cdot 10^5$ ч; $n_4 = 400$ шт. (пайки, межслойные соединения многослойных печатных плат, точки ультразвуковой сварки и контакты разъёмных соединений);

$$t_n = 25000 \text{ ч}.$$

$$\text{Вычислим по (6) } T_1 = 18777 \text{ ч}.$$

Откуда по (11) получим

$$T_2(t_n) = T_1 \left\{ 0,05 + 0,95 \exp \left[\frac{(t_n - T_1)}{(5 \cdot 10^5 - T_1)} \cdot \{\ln(0,95T_1)\}^{-1} \right] \right\} = 16656 \text{ ч}.$$

Сравним полученный результат с результатом, полученным по формуле (1).

Вычислим по (7) $T_y=1492$ ч.

Вычислим по (10) $T_{кр}=5 \cdot 10^5$ ч.

Откуда, с учетом (6) $T_1=18777$ ч, получим

$$T_2(t_n) = T_y + (T_1 - T_y) \exp \left[\frac{t_n - T_1}{T_{кр} - T_1} \ln(T_1 - T_y)^{-1} \right] = 16728 \text{ ч.}$$

Вычислим относительную ошибку между результатами, полученными по формулам (11) и (1):

$$\delta = \frac{16728 - 16656}{16728} = 0,004 \text{ (0,4\%).}$$

Зависимость $T_2(t_n)$ по (11) от суммарной наработки t_n для $T_1=18777$ ч приведена на рис. 1.

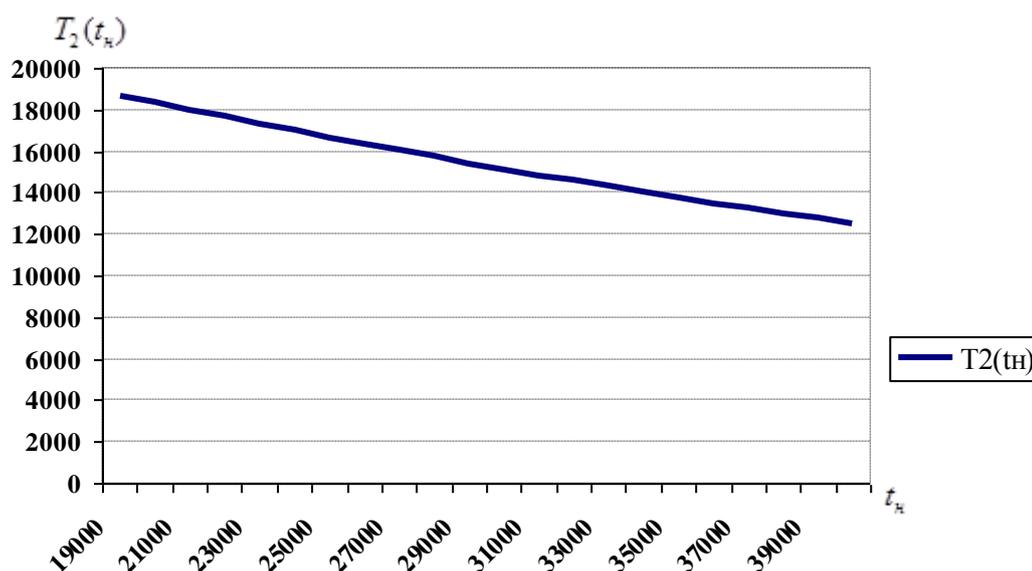


Рисунок 1 – Зависимость $T_2(t_n)$ по (11) от суммарной наработки t_n

Для вычисления приближенной оценки среднего срока службы изделия подставим в (5) выражения (9) и (10). При этом допустимое значение средней наработки на отказ изделия, после достижения которого изделие утилизируется по причине больших расходов на его ремонт, вычисляются следующим образом:

$$T_{дон} = T_2(t_n) - K_{сн} T_2(t_n) = T_2(t_n)(1 - K_{сн}), \quad (12)$$

где $T_2(t_n)$ – средняя наработка на отказ изделия на момент времени t_n , например, вычисленная по формуле (11);

$K_{сн}$ – коэффициент снижения наработки на отказ изделия задается в ТЗ на изделие и выбирается из ряда 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9.

После подстановки в (5) также выражения (11) получим упрощенную формулу для приближенной оценки величины среднего срока службы изделия:

$$T_{cl} = \frac{1}{8760K_{из}} \left\{ T_1 + \frac{(5 \cdot 10^5 - T_1) \ln \left(\frac{[T_2(t_n)(1 - K_{сн})] - 0,05T_1}{0,95T_1} \right)}{\ln 0,053} \right\}. \quad (13)$$

Примечание 2. Значение коэффициента $K_{из}=1$ соответствует непрерывной круглосуточной эксплуатации изделия, $K_{из}=0,5$ соответствует эксплуатации изделия в течение 12 часов в сутки, а $K_{из}=0,333$ соответствует эксплуатации изделия в течение 8 часов в сутки.

При $K_{сн}=0,3$ допускается снижение средней наработки на отказ изделия $T_2(t_n)$ в процессе эксплуатации на 30%, при $K_{сн}=0,5$ – на 50% и т.д.

Пример 2. Рассчитать средний срок службы изделия для случая $T_1=15000$ ч, $T_2(t_n)=12000$ ч, $K_{из}=0,5$, $K_{сн}=0,3$.

$$T_{cl} = \frac{1}{8760 \cdot 0,5} \left\{ 15000 + \frac{(5 \cdot 10^5 - 15000) \ln \left(\frac{12000(1 - 0,3) - 0,05 \cdot 15000}{0,95 \cdot 15000} \right)}{\ln 0,053} \right\} \approx 27 \text{ лет.}$$

4. Заключение

В работе получены приближенные выражения для оценки средней наработки на отказ и среднего срока службы восстанавливаемых изделий, не требующие использования полной информации о номенклатуре и характеристиках надежности элементов и составных частей, входящих в состав изделия. Для оценки этих показателей надежности используются феноменологические модели (11) и (13), параметрами которых являются ориентировочные значения средней наработки до отказа и средней наработки на отказ изделия (справочные характеристики прототипов, аналогов и предыдущих версий разработки), а также его минимально допустимый уровень снижения средней наработки на отказ, установленный в ТЗ.

Полученные приближенные оценки на основе феноменологических моделей рекомендуется использовать на этапе эскизного проектирования и формирования концепции изделия. Они позволяют получить информацию о надежности изделия при сохранении приемлемой, на данном этапе проектирования, точности и сохранении общих тенденций поведения этих показателей надежности изделия в процессе эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
2. Стрельников В.П., Сеспедес-Гарсия Н.В. Закономерности изменения средней наработки на отказ технических систем в процессе эксплуатации. *Математичні машини і системи*. 2010. № 3. С. 153–158.
3. Федухин А.В., Пасько В.П., Муха Ар.А. К вопросу моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей. *Математичні машини і системи*. 2016. № 1. С. 158–167.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2018