



УДК 621.396.69.019.3

В.П. СТРЕЛЬНИКОВ, Н.В. СЕСПЕДЕС-ГАРСИЯ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Abstract. The regularities of changes in the mean time between failures (MTBF) of restored systems through statistical modeling of the systems and theoretical estimates based on a two-parameter DN -distribution are researched. It is shown that the MTBF decreases during operation to a certain minimum value corresponding to steady-state recovery.

Key words: recoverable system, failure, mean time between failures.

Анотація. Досліджено закономірності зміни середнього напрацювання на відмову відновлюваних систем шляхом статистичного моделювання функціонування систем і теоретичних оцінок на основі двопараметричного DN -розподілу. Показано, що напрацювання на відмову зменшується у процесі експлуатації до деякого мінімального значення, що відповідає сталому стаціонарному процесу відновлення.

Ключові слова: відновлювані системи, відмова, середнє напрацювання на відмову (між відмовами).

Аннотация. Исследованы закономерности изменения средней наработки на отказ восстанавливаемых систем путем статистического моделирования функционирования систем и теоретических оценок на основе двухпараметрического DN -распределения. Показано, что наработка на отказ уменьшается в процессе эксплуатации до некоторого минимального значения, соответствующего установившемуся стационарному процессу восстановления.

Ключевые слова: восстанавливаемые системы, отказ, средняя наработка на отказ (между отказами).

1. Введение

В настоящее время существует множество схем расчета и прогнозирования средней наработки на отказ (параметра потока отказов) технических систем. Многие специалисты в своих исследованиях отождествляют «интенсивность отказов» (показатель безотказности невосстанавливаемых систем) с «параметром потока отказов» (показатель безотказности восстанавливаемых систем). Такое отождествление возможно только при использовании экспоненциального распределения, когда оценки теоретической интенсивности отказов и параметра потока отказов совпадают. Ошибочным представляется также описание изменения параметра потока отказов технических систем в виде «ваннообразной кривой» [1].

В настоящей работе представлены результаты расчета средней наработки на отказ нерезервированных восстанавливаемых систем и результаты моделирования функционирования этих систем. Отметим, что замена неисправного технического элемента замены (ТЭЗ) или модуля аппаратуры новым (не работавшим до этого момента) не восстанавливает полностью надежность характеристики всей системы. Таким образом, в процессе эксплуатации все время происходит ухудшение надежностных характеристик системы. И только когда все элементы (хотя бы один раз каждый) будут заменены на новые, в системе устанавливаются показатели безотказности (средняя наработка между отказами, параметр потока отказов) и наступает стационарный процесс восстановления. Именно такая закономерность (уменьшение средней наработки на отказ, увеличение параметра потока отказов) представляется, если моделировать отказы элементов любой двухпараметрической функцией (Вейбулла, логарифмически нормальным, α -распределением, DM -

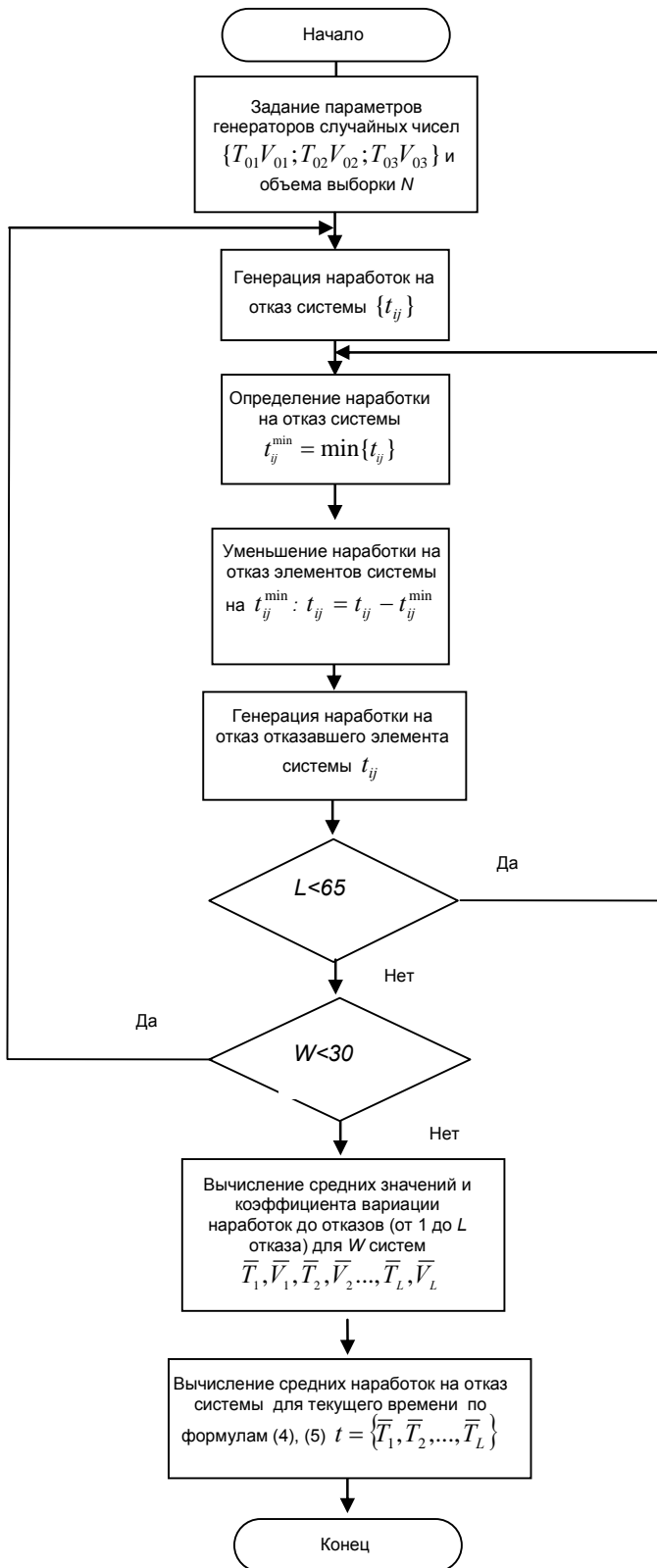


Рис. 1. Алгоритм моделирования надежности восстанавливаемой нерезервированной (последовательной) системы

– приработочные отказы отсутствуют.

распределением, DN -распределением и др.). Уменьшение средней наработки между отказами в системе с начала эксплуатации, если не учитывать приработочные отказы, является естественным при описании распределения времени до отказа элементов в виде двухпараметрических функций, имеющих одномодальную плотность. Это естественным образом приводит к моделированию старения системы, что нельзя сказать про однопараметрическую экспоненциальную функцию. Такая же закономерность уменьшения средней наработки между отказами, как правило, наблюдается у реальных технических систем.

2. Статистическое моделирование безотказности системы

Моделировалось функционирование систем, содержащих три типа элементов по N единиц с разными показателями среднего значения и коэффициента вариации наработки до отказа элементов $(T_{01}, V_{01}, T_{02}, V_{02}, T_{03}, V_{03})$.

Приняты следующие допущения:

- отказы элементов системы обнаруживаются немедленно после их возникновения;
- восстановление отказавшего элемента осуществляется мгновенно;
- отказы элементов системы независимы между собой;

Метод статистического моделирования надежности системы основан на принципе “слабого звена”, т.е. в дальнейших расчетах основных показателей надежности используется наработка на отказ системы, которой соответствует минимальное время отказа элемента системы.

Алгоритм моделирования надежности восстанавливаемой системы, состоящей из последовательно соединенных трех типов элементов по N элементов каждого типа, приведен на рис. 1.

Моделирование начинается с задания начальных параметров генераторов случайных чисел, имеющих DN -распределение:

- первый генератор моделирует показатели надежности элементов первого типа (со средней наработкой T_{01} и коэффициентом вариации наработки V_{01} в количестве N шт.);
- второй генератор моделирует показатели надежности элементов второго типа (со средней наработкой T_{02} и коэффициентом вариации наработки V_{02} в количестве N шт.);
- третий генератор моделирует показатели надежности элементов третьего типа (со средней наработкой T_{03} и коэффициентом вариации наработки V_{03} в количестве N шт.).

Работа генераторов случайных чисел начинается с последовательной генерации моментов отказов всех элементов.

Результаты моделирования заносятся в сводную таблицу, после чего производится обработка данных, т.е. выбирается минимальное значение времени отказа элементов системы, которое принимается за наработку системы до первого отказа:

$$t_{ij}^{\min} = \min \begin{Bmatrix} t_{1j} & t_{2j} & t_{3j} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{1N} & t_{2N} & t_{3N} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Далее производится уменьшение времени наработки до отказа всех элементов на время t_{ij}^{\min} . Для отказавшего элемента определенного типа генерируется новая наработка до отказа. После чего опять производится поиск минимального времени отказа элементов системы, которое принимается за наработку системы до второго отказа системы. Цикл поиска очередного отказа проводится до тех пор, пока не будет определена наработка на L -ый отказ (параметр L задается произвольно под конкретные исследования).

Для получения устойчивых статистических оценок параметров надежности системы статистический эксперимент повторяется W раз.

После проведения необходимого числа циклов моделирования вычисляются средние наработки на 1, 2, ..., L -ый отказ системы и коэффициенты вариации наработок на отказ системы по формулам:

$$T_1 = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W t_{1j}^{\min} \quad (\text{до первого отказа}),$$

.....

$$T_L = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W t_{Lj}^{\min} \quad (\text{на } L\text{-ый отказ}),$$

(2)

$$V_1 = \frac{1}{T_1} \sqrt{\frac{1}{W-1} \sum_{j=1}^W (t_{1j}^{\min} - T_1)^2} \quad (\text{до первого отказа}),$$

.....

$$V_L = \frac{1}{T_L} \sqrt{\frac{1}{W-1} \sum_{j=1}^W (t_{Lj}^{\min} - T_L)^2} \quad (\text{на } L\text{-ый отказ}).$$
(3)

3. Теоретические оценки средней наработки на отказ

Для проведения сравнительного анализа теоретических оценок и результатов моделирования вычисляются средние наработки на отказ системы в каждый момент времени t , соответствующий определению моделируемых значений $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_L\}$ по формуле [2], представляющей точную оценку путем свертки DN -распределений наработок элементов до m -го отказа:

$$T_2^{DN}(t) = \left\{ N \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^3 \left(\frac{m \sqrt{T_{0i}}}{V_{0i} t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-mT_{0i})^2}{2tV_{0i}^2 T_{0i}}} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Так же для сравнения производили вычисления априорной средней наработки на отказ системы по приближенной (феноменологической) формуле [2]:

$$T_2^{np}(t) = T_2 + (T_1 - T_2) \exp \left[\frac{t - T_1}{T_3 - T_1} \ln(T_1 - T_2)^{-1} \right], \quad (5)$$

где $t \geq T_1$, $T_1 = \left(\sum_{i=1}^K n_i T_{0i}^{-2} \right)^{-1/2}$, $T_2 = \left(\sum_{i=1}^K n_i T_{0i}^{-1} \right)^{-1}$, $T_3 = \min \left\{ \frac{T_{0i}}{n_i} \right\} n_i \left(\sqrt{1 + \frac{9v^4}{4}} - \frac{3v^2}{2} \right)$, K –

число типов элементов, n_i – число элементов i -го типа (в нашем случае $n_i = N$), T_1 – средняя наработка до первого отказа системы, T_2 – средняя наработка на отказ системы на установившемся стационарном участке, T_3 – значение наработки (времени эксплуатации), соответствующее мо-

де плотности DN -распределения наименее надежных элементов $\left(\min \left\{ \frac{T_{0i}}{n_i} \right\} \right)$.

4. Результаты статистического моделирования и расчетных оценок

Ниже на графиках представлены закономерности изменения средней наработки на отказ конкретных моделируемых систем.

На рис. 2 приведены графики для системы первого типа, состоящей из трех типов элементов (всего 300 элементов). Как видно, расчетные оценки как по точной формуле (4), так и по приближенной (феноменологической) (5), достаточно хорошо согласуются с моделируемой оценкой средней наработки на отказ системы. Явно заниженной на начальном интервале эксплуатации (до 20000 ч) представляется оценка средней наработки на отказ по экспоненциальному распределению. Для данной системы установившимся интервалом можно считать суммарную наработку по-

рядка 37000 ч, когда все оценки практически совпадают и остаются постоянными (минимальная наработка на отказ, максимальное значение параметра потока отказов).

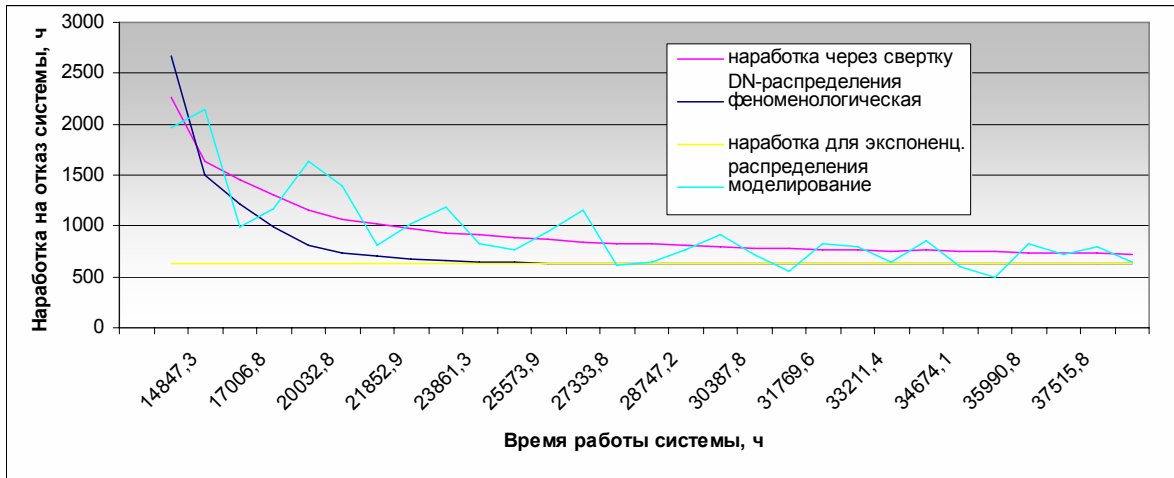


Рис. 2. Система первого типа ($T_{01} = 10^5$ ч, $T_{02} = 2,5 \cdot 10^5$ ч, $T_{03} = 5 \cdot 10^5$ ч;
 $V_{01} = V_{02} = V_{03} = 1$; $N = 100$; $W = 30$)

На рис. 3 представлены графики системы второго типа, имеющей на порядок больше число элементов с теми же показателями надежности элементов. Для этой системы характер закономерностей оценок средней наработки на отказ аналогичен предыдущему случаю. Еще большее расхождение оценок средней наработки на отказ системы на начальном интервале по экспоненциальному распределению. Так, для суммарной наработки порядка 15000 ч оценка средней наработки на отказ по экспоненциальному распределению занижена более чем в 2 раза. Началом установившегося стационарного процесса восстановления для данного типа систем представляется суммарная наработка порядка 25000 ч.

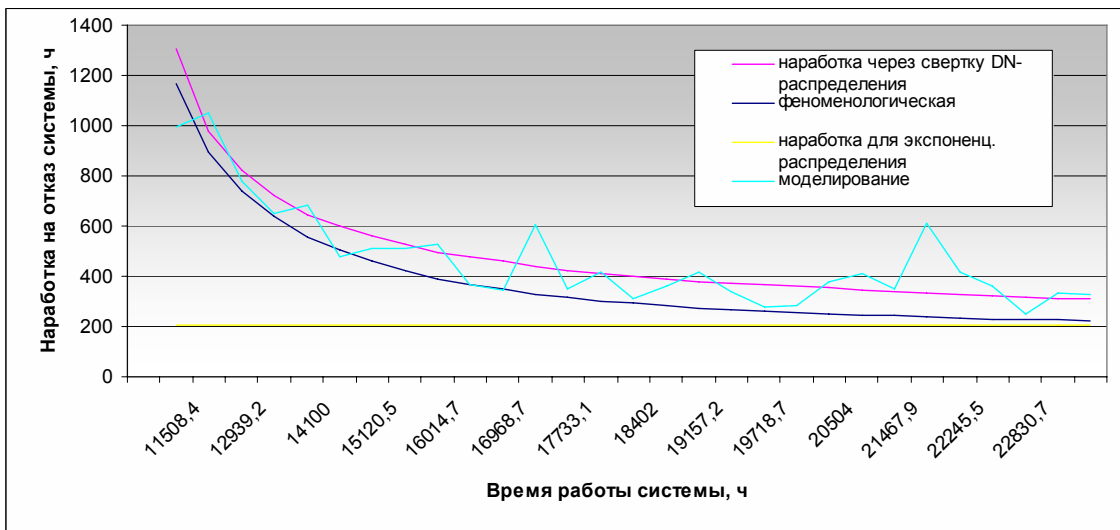


Рис. 3. Система второго типа ($T_{01} = 10^5$ ч, $T_{02} = 2,5 \cdot 10^5$ ч, $T_{03} = 5 \cdot 10^5$ ч;
 $V_{01} = V_{02} = V_{03} = 1$; $N = 300$; $W = 30$)

На рис. 4 и 5 представлены графики изменения средней наработки на отказ для аналогичных рассмотренным выше системам с разными значениями коэффициентов вариации наработки. Как видно, закономерности изменения средних наработок на отказ аналогичны, т.е. разные зна-

чения коэффициентов вариации наработок элементов практически не влияют на общие закономерности изменения средней наработки на отказ в процессе эксплуатации.

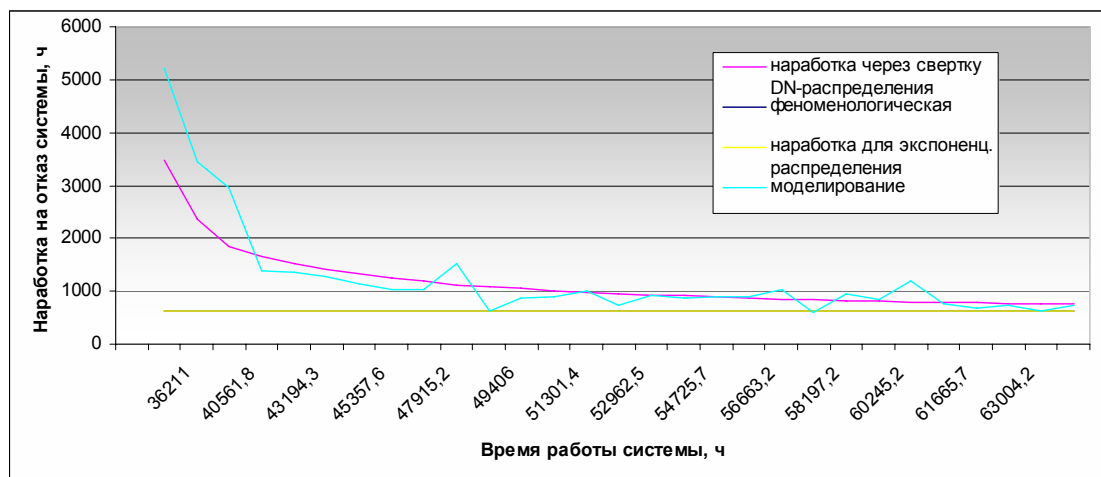


Рис. 4. Система третьего типа ($T_{01} = 10^5$ ч, $T_{02} = 2,5 \cdot 10^5$ ч, $T_{03} = 5 \cdot 10^5$ ч;
 $V_{01} = 0,5$, $V_{02} = 0,7$, $V_{03} = 1$; $N = 100$; $W = 30$)

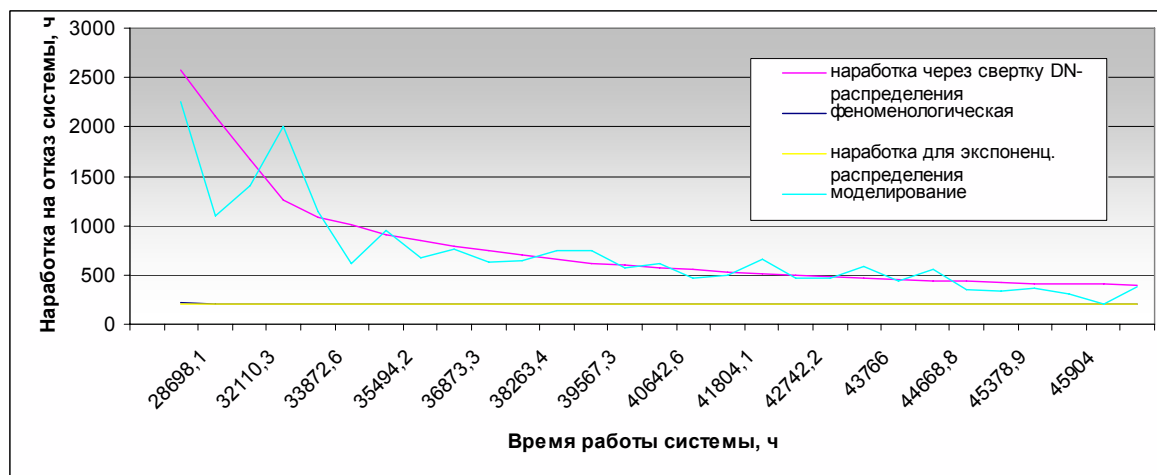


Рис. 5. Система четвертого типа ($T_{01} = 10^5$ ч, $T_{02} = 2,5 \cdot 10^5$ ч, $T_{03} = 5 \cdot 10^5$ ч;
 $V_{01} = 0,5$, $V_{02} = 0,7$, $V_{03} = 1$; $N = 300$; $W = 30$)

5. Заключение

Результаты приведенных исследований подтверждают основные закономерности поведения наработки на отказ, вытекающие из двухпараметрических моделей надежности элементов систем. Использование более адекватных двухпараметрических моделей приводит к более точным оценкам показателей безотказности восстанавливаемых технических систем (средней наработки на отказ, параметра потока отказов), которые не являются константами и изменяются в процессе эксплуатации, отражая естественное старение технических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гусев. – [2 изд., перер. и доп.]. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 704 с.
2. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2010