

УДК 519.718

А.В. ФЕДУХИН*

К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

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

Анотація. Робота присвячена вирішенню важливої проблеми продовження періоду експлуатації застарілого обладнання систем критичного призначення, планові заходи по заміні якого економічно недоцільні в даний час. При цьому необхідною умовою продовження періоду експлуатації є збереження встановлених ризиків виникнення критичних ситуацій, які можуть стати причиною аварій. Для невідновлюваних виробів прогнозується залишковий ресурс, а для відновлюваних – залишковий термін служби. Якщо в питаннях прогнозування стану механічних виробів багато проблемних питань на сьогоднішній день вирішені, то в напрямі електронних і електротехнічних виробів рішення даної проблеми вимагає подальших досліджень. Непереборні труднощі пов'язані з використанням теоретичної моделі надійності експоненціального розподілу, яка не передбачає протікання у виробі процесів деградації і старіння, що залежать від тривалості експлуатації. Як альтернатива для прогнозування залишкового ресурсу виробів електронної техніки в роботі пропонується вірогіднісно-фізична модель надійності – DN-розподіл, отримано спеціально для вирішення завдань по надійності для даного класу виробів. DN-розподіл є гнучкою двопараметричною функцією, яка найбільш точно описує будь-яку статистику відмов з різними коефіцієнтами варіації наробіток до відмови. Крім того, цей розподіл має функцію інтенсивності відмов, що змінюється в часі, яка відповідає більшості реальних об'єктів, схильних до деградації параметрів і старіння. На прикладі напівпровідникових транзисторів в роботі пропонуються методи прогнозування залишкового ресурсу виробів після тривалого зберігання без електричного навантаження і за результатами форсованих випробувань з підвищенням навантаженням.

Ключові слова: режим зберігання, режим випробувань, залишковий ресурс, теоретична модель надійності.

Аннотация. Работа посвящена решению важной проблемы продления периода эксплуатации устаревшего оборудования систем критического назначения, плановые мероприятия по замене которого экономически не целесообразны в данное время. При этом необходимым условием продления периода эксплуатации является сохранение установленных рисков возникновения критических ситуаций, которые могут стать причиной аварий. Для невозстанавливаемых изделий прогнозируется остаточный ресурс, а для восстанавливаемых – остаточный срок службы. Если в вопросах прогнозирования состояния механических изделий многие проблемные вопросы на сегодняшний день решены, то в направлении электронных и электротехнических изделий решение данной проблемы требует дальнейших исследований. Непреодолимые трудности связаны с использованием в качестве теоретической модели надежности экспоненциального распределения, которое не предполагает протекания в изделиях процессов деградации и старения, зависящих от длительности эксплуатации. В качестве альтернативы для прогнозирования остаточного ресурса изделий электронной техники в работе предлагается вероятностно-физическая модель надежности – DN-распределение, полученное специально для решения задач по надежности для данного класса изделий. DN-распределение представляет собой гибкую двухпараметрическую функцию, которая наиболее точно описывает любую статистику отказов с разными коэффициентами вариации наработок до отказа. Кроме того, данное распределение имеет функцию интенсивности отказов, изменяющуюся во времени, которая соответствует большинству реальных объектов, подверженных деградации параметров и старению. На примере полупроводниковых транзисторов в работе предлагаются методы прогнозирования остаточного ресурса изделий после длительного хранения без электрической нагрузки и по результатам форсированных испытаний с повышенной нагрузкой.

Ключевые слова: режим хранения, режим испытаний, остаточный ресурс, теоретическая модель надежности.

Abstract. The work is devoted to solving the important problem of extending the period of operation of obsolete equipment for critical systems, planned measures to replace which are not economically feasible at this time. At the same time, a necessary condition for extending the period of operation is to maintain the established risks of critical situations that could cause accidents. For non-renewable products, a residual life is predicted, and for renewable products, a residual life is predicted. If many issues have been resolved in questions of forecasting the state of mechanical products, today, in the direction of electronic and electrical products, solving this problem requires further researches. Insurmountable difficulties are connected with using, as a theoretical model, the reliability of the exponential distribution, which does not imply the occurrence of degradation and aging processes in products, depending on the service life. As an alternative to forecasting the residual life of electronic products, a probabilistic-physical reliability model is proposed – a DN-distribution obtained specifically for solving reliability problems for a given class of products. The DN-distribution is a flexible two-parameter function that most accurately describes any statistics of failures with different coefficients of variation of the mean time between failures. In addition, this distribution has a function of failure rate, which varies over time that corresponds to most real objects sensitive to degradation of parameters and aging. Drawing on the example of semiconductor transistors, methods of forecasting the residual life of products after long-term storage without electrical load and according to the results of forced tests with increased load are proposed.

Keywords: storage mode, test mode, residual life, theoretical reliability model.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-1-149-156

1. Введение

Сложность решения задачи оценки остаточного ресурса (срока службы) состоит в том, что для реальных объектов критического использования (систем управления и контроля на АЭС, систем противоаварийной автоматики ГЭС и т.п.), ядром которых являются средства автоматики и вычислительной техники, число контролируемых параметров – критериев годности (ПКГ) оборудования, сигнализирующих развитие предаварийной ситуации, весьма велико и трудно измеримо.

Примечание 1. В первую очередь речь идет не о компьютерах и периферии, которые периодически подвергаются модернизации, а об уникальном электронном и электротехническом оборудовании, которое проектируется специально для конкретной системы (датчики, аналого-цифровые преобразователи, элементы согласования, устройства связи с объектами и т.п.).

Поэтому для оценки текущего состояния оборудования в составе сложных программно-технических комплексов (ПТК) целесообразно использовать оценки остаточного ресурса составных частей (СЧ ПТК), которые позволяют прогнозировать возникновение аварийных ситуаций.

Существующие методы контроля и диагностики технического состояния СЧ ПТК направлены на выявление наиболее проблемных узлов, что позволяет предупреждать возникновение аварий путем планово-предупредительных ремонтов. Однако наиболее эффективным является использование методов прогнозирования остаточного ресурса или срока службы отдельных СЧ ПТК, позволяющих для наиболее важных узлов либо обоснованно продлить их эксплуатацию в составе ПТК, либо произвести их плановую замену на новые. Это дает возможность обеспечить требуемую надежность и безопасность эксплуатации ПТК при сохранении допустимых рисков возникновения критических ситуаций.

Таким образом, задача разработки методов и алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования по текущему состоянию ПКГ требует дальнейших исследований, особенно в области электронного, электротехнического и электромеханического оборудования [1].

Целью исследования является разработка методов оценки остаточного ресурса изделий электронной техники (ИЭТ) после их длительного хранения без электрической нагрузки и по результатам форсированных испытаний.

2. Оценка остаточного ресурса ИЭТ после длительного хранения

Отсутствие электрической нагрузки и пониженная температура, характеризующие режим хранения, значительно снижают скорость деградации ИЭТ.

Значение интенсивности отказов в режиме хранения можно оценить по формуле

$$\lambda_{xp}(t_n) = \lambda_0(t_n)a_{xp}, \quad (1)$$

где $\lambda_{xp}(t_n)$ – интенсивность отказов элемента в режиме хранения на момент времени t_n , $\lambda_0(t_n)$ – интенсивность отказов элемента в нормальном режиме эксплуатации на момент времени t_n , a_{xp} – поправочный коэффициент к интенсивности отказов.

Примечание 2. Величину $\lambda_{xp}(t_n)$ можно определить экспериментальным путем по методикам [1], если известны размер подконтрольной партии ИЭТ, количество зарегистрированных отказов (включая ситуацию при их отсутствии) и период контроля.

Для определения поправочного коэффициента a_{xp} можно воспользоваться справочными данными, представленными в виде таблиц и номограмм [2, 3]. Например, для некоторого ИЭТ при температуре $t = +10^0$ С и отсутствии электрической нагрузки $K_{эп} = 0$ определяем $a_{xp} = 0,2$. Если $\lambda_0(t_n) = 0,05 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при $t_n = 25000$ ч, то интенсивность в режиме хранения равна $\lambda_{xp}(t_n) = \lambda_0(t_n)a_{xp} = 0,01 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Примечание 3. Привязка интенсивности отказов к наработке, в течение которой она определялась, свойственна исключительно вероятностно-физическому подходу к теории надежности, основанному на специально разработанных вероятностно-физических моделях отказов (*DN* и *DM*-распределениях) [4]. Процедура оценки средней наработки до отказа ИЭТ (t) осуществляется по значениям интенсивности отказов $\lambda(t_n)$, наработки, которой она соответствует (t_n) и коэффициента вариации наработки до отказа V [4]. В случае отсутствия точных экспериментальных данных о величине V , для ИЭТ принимается априорное значение $V = 1$.

Примеры расчетов средней наработки до отказа приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Примеры расчета средней наработки до отказа ИЭТ через значения интенсивностей отказов

Интенсивность отказов, 1/ч	Наработка, ч	Средняя наработка до отказа в нормальном режиме t_0 и режиме хранения t_{xp} , ч
$\lambda_0(t_n) = 0,05 \cdot 10^{-6}$	$t_n = 25000$	$t_0 = 410000$
$\lambda_{xp}(t_n) = 0,01 \cdot 10^{-6}$	$t_n = 25000$	$t_{xp} = 490000$

Нетрудно видеть, что для приведенного в качестве примера транзистора средняя наработка до отказа в режиме хранения превышает среднюю наработку до отказа в нормальном режиме эксплуатации на 20%.

Оценка остаточного ресурса после хранения в течение времени τ вычисляется по формуле [4]

$$\pi(\tau) = \frac{(t_{xp} - \tau) \Phi\left(\frac{t_{xp} - \tau}{V_{xp} \sqrt{t_{xp} \tau}}\right) + (t_{xp} + \tau) \exp(2V_{xp}^{-2}) \Phi\left(-\frac{t_{xp} + \tau}{V_{xp} \sqrt{t_{xp} \tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{t_{xp} - \tau}{V_{xp} \sqrt{t_{xp} \tau}}\right) - \exp(2V_{xp}^{-2}) \Phi\left(-\frac{t_{xp} + \tau}{V_{xp} \sqrt{t_{xp} \tau}}\right)}. \quad (2)$$

Пример 1. Необходимо оценить остаточный ресурс германиевых транзисторов, входящих в состав запасных частей устаревших средств связи военного назначения, хранящихся в течение 20 лет в неотопляемом помещении. Транзисторы исследовались на работоспособность и соответствие справочным данным параметров: коэффициент усиления по току K_{ycl} , обратный ток коллектора $I_{ко}$, обратный ток эмиттера $I_{эо}$. Отказавших элементов в исследованной партии обнаружено не было [5].

Для приведенного выше примера оценим величину остаточного ресурса транзисторов по формуле (2) при $V_{xp}=1$, $t_{xp}=490000$ ч и $\tau=20$ лет= 175200 ч. $\pi(\tau)=420000$ ч \approx 48 лет.

Таким образом, по истечении 20 лет хранения транзисторов их остаточный ресурс в режиме хранения составит 48 лет, то есть на момент окончания этого периода транзисторы будут работоспособными.

2. Оценка остаточного ресурса ИЭТ в нормальном режиме эксплуатации после длительного хранения

Для оценки остаточного ресурса ИЭТ в нормальном режиме эксплуатации (π) после его хранения в течение времени τ необходимо пересчитать $\pi(\tau)$ к π с помощью поправочного коэффициента:

$$a_1 = \frac{\lambda_0(t_n)}{\lambda_{xp}(t_n)} = 5. \quad (3)$$

Связь a_1 с поправочным коэффициентом к средней наработке до отказа b_1 имеет вид (4)

$$a_1 = \sqrt{b_1} \exp \left\{ \frac{1}{2V^2 x_0} \left[1 - b_1 + \frac{x_0^2 (b_1 - 1)}{b_1} \right] \right\}, \quad (4)$$

где $x_0 = \frac{t_n}{t_0}$ – относительная наработка, $t_n=25000$ ч, $t_0=410000$ ч, $V=1$.

Для приведенного выше примера $x_0=0,06$. Подставив исходные данные и решив численно уравнение (4) относительно b_1 , получим $b_1=0,792$.

Так как выражение для поправочного коэффициента b_1 имеет вид

$$b_1 = \frac{t_0}{t_{xp}} = \frac{\pi}{\pi(\tau)}, \quad (5)$$

откуда

$$\pi = \pi(\tau) b_1. \quad (6)$$

Подставив исходные данные $\pi(\tau)=420000$ ч и $b_1=0,792$ в (6), получим $\pi=333000$ ч \approx 38 лет. Таким образом, по истечении 20 лет хранения транзистор можно эксплуатировать в нормальном режиме еще 38 лет.

3. Оценка остаточного ресурса ИЭТ в форсированном режиме испытаний по статистике отказов

Отказы ИЭТ, к которым относятся полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные микросхемы (ИМС), принято разделять на параметрические и катастрофические.

Параметрическим отказом называется отказ ИЭТ, вызванный выходом за пределы допуска какого-либо параметра-критерия годности (ПКГ). Например, коэффициента уси-

ления, величины обратного тока коллектора, переходного сопротивления, остаточного напряжения и т.п.

ИЭТ, находясь в состоянии параметрического отказа, как правило, сохраняет свою работоспособность, но его выходные характеристики назначения таковы, что они могут привести к нарушению работоспособности элемента, подключенного вслед за элементом, находящимся в состоянии параметрического отказа.

Полным отказом называется отказ ИЭТ, вызванный нарушением физической структуры и прекращением выполнения хотя бы одной из основных функций назначения ИЭТ. Например, пробой $p-n$ -перехода, обрыв токоведущего проводника, короткое замыкание элементов металлизации и т.п. Природа параметрических и полных отказов одинакова. В ее основе лежат необратимые процессы деградации, протекающие в материалах, из которых изготовлено ИЭТ.

Пример 2. Рассмотрим результаты форсированных испытаний на срок службы низкочастотного германиевого микросплавного $p-n-p$ транзистора [6]. В течение $t_{исп}=16000$ ч испытанию подверглась выборка транзисторов в количестве $N=50$ шт. при повышенной температуре окружающей среды $t=+40^{\circ}C$ и предельной электрической нагрузке $P_k=200mВт$.

При анализе результатов форсированных испытаний на срок службы были установлены следующие критерии отказов. Параметрические отказы: коэффициент усиления по току $K_{ycl} \leq 13$, обратный ток коллектора $I_{ко} \geq 100mkA$, обратный ток эмиттера $I_{эо} \geq 100mkA$. Полные отказы: обрыв $p-n$ -перехода, короткое замыкание $p-n$ -перехода, обрыв и потеря контакта токоведущих проводников.

Примечание 4. В рамках вероятностно-физического подхода в качестве наиболее информативного ПКГ данного типа транзисторов выбирается обратный ток коллектора $I_{ко}$, имеющий достаточно высокий коэффициент вариации, сравнимый с коэффициентом вариации наработки до отказа полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [4].

Через каждые 2 тыс. ч форсированных испытаний проводились измерения ПКГ каждого транзистора. За время испытаний было зафиксировано 10 отказов, из которых 6 являются параметрическими, а 4 – полными. Распределение отказов во времени приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Распределение отказов микросплавных транзисторов $p-n-p$ типа по результатам форсированных испытаний на срок службы

Время испытаний, тыс. ч	Вид и количество отказов, шт.	
	Параметрические	Полные
2	-	1
4	2	-
6	1	1
8	1	-
10	-	1
12	-	-
16	2	1

При детальном рассмотрении поведения ПКГ типа $I_{ко}$ можно выделить две очень важные особенности. ПКГ типа $I_{ко}$ имеет устойчивую тенденцию к увеличению с постоянной скоростью и немонотонность реализаций во времени для каждого прибора в отдельности (рис. 1).

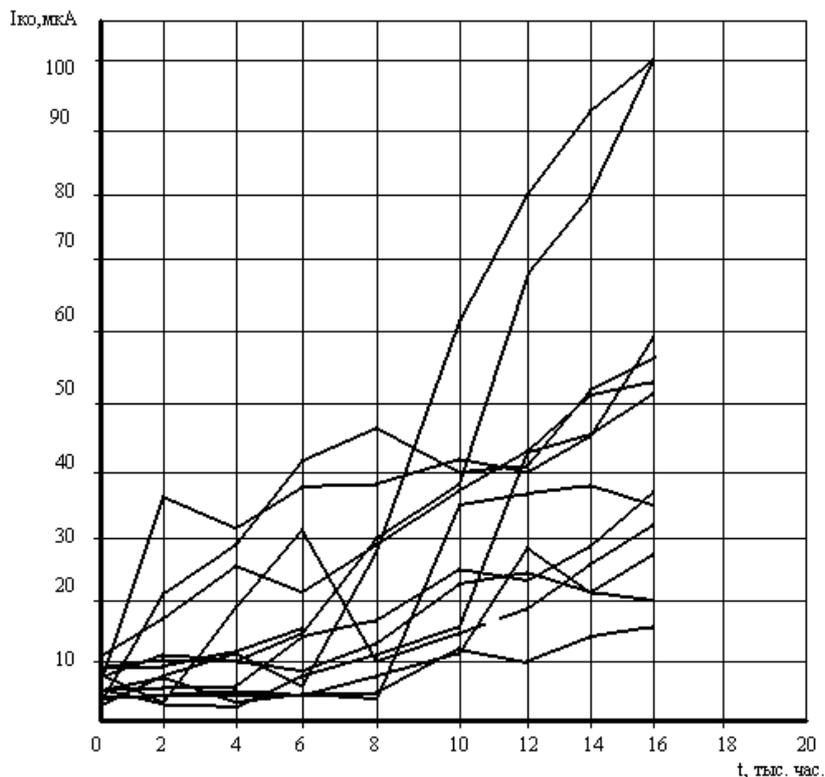


Рисунок 1 – Реализации зависимости ПКГ от времени форсированных испытаний для микросплавного $p-n-p$ транзистора

Это обстоятельство позволяет принять в качестве теоретической модели надежности транзисторов DN -распределение наработки до отказа, функцию распределения которого удобно представить в виде

$$F(x;1,V_1) = \Phi\left(\frac{x-1}{V_1\sqrt{x}}\right) + \exp(2V_1^{-2})\Phi\left(-\frac{x+1}{V_1\sqrt{x}}\right), \quad (7)$$

где $x = a_1 t_{ucn}$, a_1 – средняя скорость деградации (изменения ПКГ) в форсированном режиме испытаний 1/ч, t_{ucn} – продолжительность испытаний, V_1 – коэффициент вариации наработки до отказа (изменения ПКГ) в форсированном режиме испытаний.

В этом случае средняя наработка до отказа транзисторов имеет простую связь с параметром масштаба DN -распределения, а именно:

$$t_1 = a_1^{-1}. \quad (8)$$

Оценка параметра масштаба DN -распределения a_1 осуществляется путем решения уравнения (7) относительно x :

$$F(x;1,V_1) = \hat{F}_1(t_{ucn}), \quad (9)$$

где $\hat{F}_1(t_{ucn}) = \frac{r}{N}$ – эмпирическая вероятность отказа транзисторов за время форсированных испытаний t_{ucn} , r – количество отказавших транзисторов за время форсированных испытаний t_{ucn} .

По значению $\hat{F}_1(t_{ucn.})$ и V_1 и таблицам [4] определяется значение x . Оценка средней скорости деградации (изменения ПКГ) в форсированном режиме имеет следующий вид:

$$a_1 = \frac{x}{t_{ucn.}}. \quad (10)$$

Оценка коэффициента вариации процесса деградации V (изменения ПКГ) осуществляется графоаналитическим методом [7], для чего с использованием критерия согласия и данных табл. 2 определяется значение V_1 , при котором DN -распределение наилучшим способом описывает представленную статистику отказов. В нашем случае $V_1=1,15$.

Вычислим эмпирическую вероятность отказа транзисторов на момент окончания форсированных испытаний ($t_{ucn.}=16$ тыс. ч): $\hat{F}_1(t_{ucn.}) = \frac{r}{N} = 0,2$. По значению $\hat{F}_1(t_{ucn.})$, V_1 и таблицам [4] определяем x : $x=0,28$. Оценка средней скорости деградации методом квантилей определяется по (10): $a_1 = \frac{x}{t_{ucn.}} = 1,756 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Средняя наработка до отказа транзисторов в форсированном режиме вычисляется следующим образом: $t_1 = a_1^{-1} = 56947$ ч.

Оценим остаточный ресурс 40 работоспособных транзисторов, выдержавших форсированные испытания в течение $\tau = 16000$ ч.

$$\pi(\tau) = \frac{(t_1 - \tau)\Phi\left(\frac{t_1 - \tau}{V_1\sqrt{t_1\tau}}\right) + (t_1 + \tau)\exp(2V_1^{-2})\Phi\left(-\frac{t_1 + \tau}{V_1\sqrt{t_1\tau}}\right)}{\Phi\left(\frac{t_1 - \tau}{V_1\sqrt{t_1\tau}}\right) - \exp(2V_1^{-2})\Phi\left(-\frac{t_1 + \tau}{V_1\sqrt{t_1\tau}}\right)}, \quad (11)$$

Получим $\pi(\tau) = 43434 \approx 5$ лет. В результате такой работы транзисторы утратили 76% своего первоначального ресурса.

Таким образом, по истечении 16 тыс. часов форсированных испытаний оставшиеся исправными транзисторы могут проработать в форсированном режиме еще 5 лет.

4. Выводы

В области прогнозирования остаточного ресурса ИЭТ наиболее предпочтительным является вероятностно-физический подход, основанный на использовании более эффективной двухпараметрической модели надежности – диффузионного распределения наработки до отказа (DN -распределения).

При прогнозировании остаточного ресурса германиевых транзисторов по истечении 20 лет хранения установлено, что он составил 48 лет, после чего транзисторы можно эксплуатировать в нормальном режиме еще 38 лет.

Остаточный ресурс данного устаревшего полупроводникового элемента при вводе его в эксплуатацию после длительного хранения при положительной среднегодовой температуре $+10^0\text{C}$ и отсутствии электрической нагрузки за 20 лет хранения уменьшился всего на 20%.

В случае форсированных испытаний в течение 16 тыс. часов устаревшего типа германиевых микросплавных транзисторов при повышенной температуре окружающей среды и максимальной электрической нагрузке установлено, что за время испытаний транзисто-

ры утратили 76% своего первоначального ресурса. При этом остаточный ресурс успешно выдержавших испытания транзисторов в форсированном режиме составляет 5 лет.

Результаты количественной оценки остаточного ресурса устаревших типов транзисторов на сегодняшний день не имеют практического значения. Однако полученные результаты позволяют осмыслить закономерности изменения этого параметра надежности ИЭТ во времени, а представленные методы оценки – это эффективный инструментарий для исследования остаточного ресурса современной элементной базы ПТК.

Использование интерактивно управляемого режима хранения как способа продления ресурса работы необслуживаемых электронных приборов, устройств и систем (космических спутников, усилителей подводных кабельных линий связи и т.п.) является эффективным способом увеличения безотказности таких объектов в период длительной эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ДСТУ 8647:2016. Надійність техніки. Оцінювання і прогнозування надійності за результатами випробувань и/или експлуатації в умовах малої кількості відмов. К.: Видавництво Держстандарту України, 2017. 23 с.
2. Справочник. Надёжность электрорадиоизделий. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
3. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА / под ред. Л.Г. Дубицкого. М.: Радио и связь, 1983. 232 с.
4. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
5. Федухин А.В. Прогнозирование надежности электронных устройств после длительного хранения. *Математичні машини і системи*. 2004. № 4. С. 164–170.
6. Федухин А.В. Прогнозирование параметрической надежности полупроводниковых приборов с использованием диффузионного распределения наработки до отказа. *Математические машины и системы*. 1999. № 2. С. 117–122
7. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В. К вопросу об оценке коэффициента вариации наработки до отказа по квантилям малого уровня. *Надежность*. 2018. Т. 18, № 4. С. 10–15.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2020