



УДК 621.3.019

В.П. СТРЕЛЬНИКОВ

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И АППАРАТУРЫ

Abstract: The work gives survey of the problem of research of reliability and analyses of causes of non adequate solution of reliability today. The work examines probability-physical methods, as new technology the research reliability, which can solve problems of reliability more effectively.

Key words: reliability, life, failure, instantaneous failure rate.

Анотація: Дається огляд стану проблеми дослідження надійності й аналіз причин неадекватності рішення завдань надійності на сучасному етапі. Розглядаються ймовірно-фізичні методи як нова технологія дослідження надійності, здатна більш ефективно вирішувати завдання надійності.

Ключові слова: надійність, ресурс, відмова, інтенсивність відмов.

Аннотация: Дается обзор состояния проблемы исследования надежности и анализ причин неадекватности решения задач надежности на современном этапе. Рассматриваются вероятностно-физические методы как новая технология исследования надежности, способная более эффективно решать задачи надежности.

Ключевые слова: надежность, ресурс, отказ, интенсивность отказов.

1. Введение

Появление надежности как прикладной математической дисциплины связывают с 50–60 годами прошлого века, когда в различных отраслях техники начали создаваться большие и сложные технические системы: системы военного назначения, национальные и интернациональные системы связи, информационно-вычислительные системы, транспортные системы и т.д. В связи с этим возникла острая проблема надежности, т.е. обеспечение функционирования и работоспособности этих сложных и дорогостоящих систем.

Все многообразие исследований надежности направлено на решение следующих трех проблем: оценка и прогнозирование надежности изделий на этапах проектирования (априорные методы); экспериментальная оценка показателей надежности, т.е. подтверждение проектируемого уровня надежности по результатам испытаний или эксплуатации (апостериорные методы); принятие мер по достижению и обеспечению заданного уровня надежности путем оптимизации стратегии технического обслуживания, резервирования, объема запасных частей и т.д. (оптимизационные задачи).

Традиционно сложилось некоторое разделение в направлениях теории и практики надежности машин (механических объектов, технических систем, содержащих механические узлы) и аппаратуры (изделий электронной техники, технических устройств, содержащих электронные и радиоэлементы). Следует отметить, что существующие методы исследования надежности машин и аппаратуры как у нас в стране, так и за рубежом, все более не удовлетворяют требованиям практики и уровню технологии производства. В обзорах о состоянии технологии исследования надежности за последние годы [1–6] все чаще и чаще звучит разочарование в существующей технологии исследования надежности, поскольку слишком часто и намного расходятся прогнозные оценки и реальные значения показателей надежности.

Основные задачи надежности машин и аппаратуры – установление закономерностей возникновения отказов и оценка количественных показателей надежности – могут решаться двумя различными путями. До настоящего времени в теории и практике надежности наибольшее развитие получило направление, основанное на использовании только вероятностных концепций (строго вероятностная теория). В этом случае отказы рассматриваются как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния изделий сводятся к двум состояниям: исправности и неисправности. Методология получения конечных результатов о надежности изделий согласно строго вероятностной (статистической) теории состоит в следующем. На основании испытаний или эксплуатации получают статистику отказов изделий. Далее, используя известные статистические критерии согласия, выбирают наиболее подходящую модель распределения случайных величин, разработанную в теории вероятностей (экспоненциальное, нормальное, Вейбулла, логарифмически нормальное и др.), и принимают ее в качестве теоретической модели распределения вероятностей безотказной работы (модели надежности), на основании которой определяют необходимые количественные показатели надежности. Оценка (расчет) надежности систем осуществляется путем вычисления вероятностей работоспособных состояний элементов. Необходимо отметить, что преимущественно развитые статистические методы оценки надежности, вошедшие в основные нормативные материалы, недостаточно эффективны при оценке надежности вновь разрабатываемых, высоконадежных или единичных изделий, находящихся в эксплуатации, т.е. там, где малочисленна или вообще отсутствует статистика отказов. Кроме того, отсутствие связи показателей надежности с физическими характеристиками изделий и внешними условиями эксплуатации не дает возможности эффективно управлять проектированием и обеспечением необходимого уровня надежности разрабатываемых изделий.

Строго вероятностные концепции надежности были признаны недостаточными уже в самом начале развития надежности как науки. Академик Б.В. Гнеденко, определяя пути более эффективного развития теории надежности, подметил в предисловии к работе [7], что “включение в теорию надежности физических представлений о процессах износа, несомненно, призвано способствовать повышению возможностей теории и практики надежности”. В работах Б.С. Сотскова [8], Р. Хевиленда [9] и других исследователей принято, что сочетание вероятностных методов с “глубоким проникновением в физическую сущность процессов, протекающих в изделии”, является наиболее верным направлением дальнейшего развития теории и техники надежности, и поэтому начато изучение надежности изделий в связи с механо-физико-химическими свойствами последних, условиями эксплуатации и хранения [8–14]. Таким образом, второй путь установления количественных показателей надежности в отличие от строго вероятностного подхода основан на изучении механо-физико-химических свойств и некоторых физических параметров изделий, характеризующих техническое состояние последних, с использованием вероятностных методов. Методология установления количественных показателей надежности на основании изучения определенных физических параметров, характеризующих техническое состояние изделий, состоит в выявлении кинетических закономерностей деградационных процессов (построение

математических моделей процессов деградации) и определении аналитической связи этих закономерностей с показателями надежности.

Известно, что при решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности (функции распределения наработки до отказа), которые в конечном итоге определяют точность получаемых оценок. При этом методические погрешности, обусловленные теоретической моделью, могут иметь весьма большие значения и сводить практически на нет результаты оптимизационных задач. Арсенал используемых на практике теоретических моделей надежности невелик. Наиболее распространенным является однопараметрическое экспоненциальное распределение. Из двухпараметрических моделей чаще используются распределения Вейбулла и логарифмически нормальное и в меньшей мере – нормальное, гамма- и альфа- распределения. Общепринято применять экспоненциальное распределение для решения задач надежности электронных изделий и систем, а указанные двухпараметрические модели – для механических объектов. Следует обратить внимание на то, что все расчеты, а также оптимизационные задачи надежности, как правило, решаются на основе использования однопараметрического экспоненциального распределения, поскольку использование вышеупомянутых более адекватных двухпараметрических моделей для получения точных решений встречает непреодолимые трудности математического характера. В связи с этим исследователи вынуждены применять экспоненциальное распределение для решения задач надежности и механических объектов, где его использование противопоказано.

Ниже автор попытается вскрыть причины неэффективности распространенной технологии исследования надежности и обратить внимание на вероятностно-физические методы исследования надежности, которые позволяют решать все основные задачи надежности на качественно новом уровне по сравнению с традиционными методами и, по сути, представляют новую технологию исследования надежности.

2. Анализ причин неадекватности решений задач надежности

Анализируя работы по надежности последних лет [15–22], можно сделать вывод, что основная масса работ по этой проблеме посвящена постановке и решению всякого рода оптимизационных задач, а также задачам, связанным с проблемой интервального оценивания показателей надежности по результатам испытаний или эксплуатации. Много работ посвящено совершенствованию экспоненциальной модели за счет разного рода эмпирических коэффициентов. Практически основная масса задач надежности решается с использованием однопараметрического экспоненциального распределения. Это и является основной причиной неадекватности решений задач надежности. Однопараметричность модели, с одной стороны, упрощает решение задач надежности, с другой стороны, накладывает на модель ряд существенных ограничений и делает ее весьма грубо приближенной.

Некоторые выводы, вытекающие из экспоненциального закона, не поддаются осмыслению и даже являются порочными. Например, экспоненциальное распределение абсолютно не учитывает старение и износ, т.е. исключает необходимость выбора более качественных материалов при производстве изделий или проведении профилактики в процессе эксплуатации.

Экспоненциальное распределение имеет максимальную плотность отказов (частоту отказов) в момент включения, т.е. соответствует низкой технологии и качеству изготовления. Другими словами, чем хуже выполнена техника, тем более подходящей оказывается модель экспоненциального распределения для описания ее надежности. Фиксированы все моменты экспоненциального распределения, начиная со второго (коэффициент вариации всегда равен единице, коэффициент асимметрии – двум, коэффициент эксцесса – девяти). Последнее свидетельствует о том, что исследователи имеют дело только с математическим ожиданием, т.е. время до отказа объектов фактически представляется детерминированной величиной. Особенно ярко недостатки однопараметрической экспоненциальной модели проявляются при решении таких задач надежности, как дальний прогноз. Так, прогноз среднего ресурса высоконадежных изделий электронной техники или прогноз гамма-процентного ресурса для очень малых уровней вероятности отказа отличается от прогноза более адекватных двухпараметрических моделей в 50–100 и более раз [20].

Как известно, экспериментальная оценка показателей надежности является обязательным этапом и практически основным способом установления реально достигнутого уровня надежности в процессе разработки и серийного выпуска изделий. Наиболее распространенными являются контрольные испытания на надежность, причем, как правило, с ограничением продолжительности испытаний ($t_u \ll T_o$, где t_u – продолжительность испытаний, T_o – контролируемое значение средней наработки до отказа). Поскольку по своим формальным свойствам экспоненциальный закон допускает в начальный период наибольшее количество отказов, это приводит к тому, что в результате контроля пропускаются изделия, имеющие более низкий реальный уровень, чем контролируемый. В настоящее время для типичных (гостированных) планов испытаний происходит завышение реального уровня надежности (средней наработки) в 2 и более раз для изделий типа ПЭВМ, телевизор и т.п., а для высоконадежных изделий типа интегральных микросхем, полупроводниковых приборов прогноз среднего ресурса завышается в 50–500 и более раз [13, 14, 23].

При использовании экспоненциального распределения исследователи принимают чрезвычайно грубое допущение о постоянстве интенсивности отказов, поскольку реальное значение интенсивности отказов за рассматриваемые интервалы времени (наработки) изменяется (увеличивается) в несколько десятков раз. Именно это обстоятельство служит одной из причин огромной методической погрешности оценок при расчете надежности систем на основе интенсивностей отказов элементов (лямбда-метода). Установлено [13, 24, 25], что оценка средней наработки до отказа систем по экспоненциальному распределению (лямбда-методом) занижается в \sqrt{n} раз, где n – число элементов в системе, соединенных последовательно в смысле надежности. Таким образом, использование экспоненциального распределения на практике для прогноза, например, средней наработки до отказа, приводит к существенному *завышению* надежности отдельных элементов (устройств с небольшим количеством, менее 10^4 элементов) и также к существенному *занижению* прогнозируемой надежности больших систем (более 10^5 элементов). Эти погрешности, которые могут иметь очень большие значения и разные знаки

(завышение, занижение), послужили причиной недоверия прогнозным оценкам на основе экспоненциального распределения.

В ряде работ зарубежных специалистов [26, 27] совершенно справедливо отмечается, что широко распространенный стандарт MIL-HDBK-217, основанный на использовании экспоненциального распределения, не предназначен для того, чтобы обеспечить показатель надежности с гарантированной точностью. Скорее, он предназначен для использования в качестве инструмента при оценке пригодности новых проектов и сравнении различных проектов. Модель экспоненциального распределения уже давно резко критиковалась [28, 29]. Однако до сих пор из-за отсутствия подходящей математической модели, которая позволяла бы решать основные задачи надежности (в том числе расчет надежности систем) на инженерном уровне, исследователи вынуждены пользоваться критикуемым математическим аппаратом [7, 15–22, 25, 29].

Необходимо также отметить следующее. Использование “интенсивности отказов” в качестве показателя безотказности объектов, во-первых, связано с применением только грубого однопараметрического экспоненциального распределения, во-вторых, многие специалисты в своих исследованиях отождествляют “интенсивность отказов” (показатель безотказности невосстанавливаемых объектов) с “параметром потока отказов” (показателем безотказности восстанавливаемых объектов) [15, 29]. Такое отождествление справедливо опять-таки только при использовании экспоненциального распределения, когда теоретические интенсивности отказов и параметр потока отказов объекта совпадают. На самом же деле эмпирические (реальные) характеристики сопоставляемых показателей (интенсивности отказов и параметра потока отказов) имеют совершенно разные закономерности во времени [13, 30]. Установлено [13, 30–32], что эмпирическая “интенсивность отказов” имеет немонотонный характер, многосовпадающий с кривой плотности распределения на начальном участке (до выхода из строя порядка 30-40% изделий), но отличающийся от традиционного представления в виде “ваннообразной” кривой, более характерной для “параметра потоков отказов”. В связи с вышеуказанным представляется, что “интенсивность отказов” является весьма неудобной характеристикой для исследования безотказности объектов. Более эффективными характеристиками при исследовании безотказности являются функция распределения (плотность распределения) наработки или интегральные характеристики типа “средняя наработка”. Последние, очевидные, рекомендации не соблюдаются в современной теории и практике надежности опять-таки вследствие широкого использования экспоненциального распределения.

Существующие методики типа «анализ тренда потока отказов» таких ответственных объектов, как оборудование АЭС [33] и др., основанные на использовании закономерностей экспоненциального закона и предшествующие прогнозированию остаточного ресурса (срока службы) и назначению регламентированного срока эксплуатации, представляют собой весьма грубые качественные оценки и прогноз. Эти методики не приводят к количественным оценкам показателей надежности эксплуатируемого оборудования. Сама гипотеза, лежащая в основе метода «анализ тренда», противоречит элементарному физическому понятию об износе и старении любого оборудования при длительной эксплуатации (10 – 20 лет).

Одной из причин неудовлетворительного решения задач надежности для механических объектов (деталей машин и систем) является использование нормального распределения в качестве теоретической модели распределения наработки (ресурса). Хотя общеизвестны рекомендации об использовании нормального распределения в задачах надежности при коэффициенте вариации распределения наработки менее 0,25. Известно и то, что, как правило, коэффициент вариации наработки практически любых технических объектов превышает величину 0,25. Однако исследователи используют в данном приложении нормальное распределение из соображений удобства расчета (простоты формульных выражений) с последующими существенными методическими погрешностями в оценке искомых показателей надежности. В частности, в этой ситуации при задании высокого уровня вероятности отсутствия отказа (γ) можно получить отрицательные значения прогнозируемой гамма-процентной наработки (ресурса). Весьма некорректными являются широко распространенные оценки вероятности безотказной работы с использованием схем “нагрузка-прочность” и “параметр – поле допуска” на основе нормального распределения. При этом оценки вероятности безотказной работы, как правило, не связаны с наработкой (временем) [34].

3. Вероятностно-физические методы как новая технология исследования надежности

В последние годы все большее распространение получают вероятностно-физические модели надежности [13, 14, 36–57], которые могут успешно заменить существующий аппарат исследования и прогнозирования надежности. Вероятностно-физический подход основан на использовании законов распределения отказов (моделей надежности), вытекающих из анализа физических процессов деградации и приводящих к отказу. При этом физические процессы деградации рассматриваются в виде случайных процессов. Последний подход к исследованию надежности назван нами *вероятностно-физическим*, поскольку он непосредственно устанавливает связь вероятности достижения предельного уровня физическим определяющим параметром, т.е. связывает значение *вероятности* отказа и *физического* параметра, вызывающего отказ. Вследствие этого параметры получаемого вероятностного распределения отказов имеют определенный физический смысл. В частности, в рассматриваемых двухпараметрических вероятностно-физических моделях отказов [13] параметр масштаба совпадает со значением средней скорости изменения определяющего параметра, а параметр формы – с коэффициентом вариации этой скорости. Распределение отказов (распределение наработки до отказа), параметры которого имеют конкретную физическую интерпретацию, в отличие от строго вероятностных распределений (моделей) отказов (экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального и др.), принято называть вероятностно-физическим распределением (моделью) отказов [13]. Заметим, что в литературе встречается целый ряд различных определений (названий) таких моделей: “физико-вероятностные” [10], “математико-физические” [12], “физико-статистические” [58] и др. Все эти определения отражают одну идею: функция распределения наработки до отказа является функцией некоторых статистических характеристик объекта или процесса деградации. Таким образом, вероятностно-физические распределения наработки до отказа (модели отказов) получены математически корректно и специально для описания явления надежности в отличие от

строго вероятностных моделей отказов (экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального и других распределений), ранее заимствованных из теории вероятностей и математической статистики для решения задач надежности.

Под определяющими параметрами в данном случае имеются в виду такие “первичные” физические параметры (скопление дислокаций и других дефектов, пластические и упругие деформации, механический износ, проводимость контактирующих, сплошных проводников тока, p/n переходов и т.д.), превышение которыми определенных предельных значений приводит к отказу. Функциональные параметры, как правило, являются “вторичными” характеристиками, свидетельствующими о расходе ресурса и наступлении отказа, но они также успешно используются в качестве прогнозирующих параметров. Первые исследователи [8, 10, 11], развивавшие вероятностно-физический подход, например, анализировали поведение таких функциональных определяющих параметров, как зазор в сопряжениях (механический износ), силу тока или напряжение в полупроводниковых приборах и т.д., достижение которыми определенных значений рассматривалось как отказ изделия. Поэтому этот подход более известен в литературе как исследование возникновения так называемых постепенных или параметрических отказов.

Определение “вероятностно-физическая” модель надежности является более общим, чем определение “параметрическая” модель надежности. Есть много изделий, в которых протекают многочисленные физические процессы деградации, т.е. имеется множество определяющих параметров, способных вызвать отказ изделия. Например, у изделий электронной техники типа интегральных схем практически невозможно назвать все определяющие параметры, вызывающие отказы многочисленных компонентов, и тем более измерить их. В таком случае остается возможность только статистической оценки средней скорости обобщенного процесса деградации изделия. Однако несомненно то, что в этих изделиях протекают физические процессы деградации, которые определяют соответствующую вероятность разрушения, т.е. этим изделиям соответствует определенная вероятностно-физическая модель надежности.

Существуют несколько схем формализации вероятностно-физических моделей отказов, подробно описанных во многих публикациях [10–14, 52]. В [13, 14, 52] дается подробный сравнительный анализ. При этом рассматриваются четыре схемы формализации. Рассмотрен веерный случайный процесс, которому соответствует альфа-распределение; “сильно перемешанный” гауссовский процесс, которому соответствует нормальное параметрическое распределение; непрерывный марковский процесс с монотонными реализациями, которому соответствует диффузионное распределение, названное DM -распределением; непрерывный марковский процесс с немонотонными реализациями, которому соответствует диффузионное распределение, названное DN -распределением.

Математические модели процессов деградации в виде непрерывных марковских процессов представляются несомненно более адекватными для случайных процессов разрушения, чем идеализированный линейный веерный процесс или “сильно перемешанный” гауссовский процесс с постоянно уменьшающимся коэффициентом вариации. На основании выравнивания значительного количества данных отказов самых различных объектов [13, 14, 52] показано, что диффузионные распределения (DM и DN) являются более гибкими функциями, лучше выравнивающими опытные

данные, по сравнению с известными двухпараметрическими строго вероятностными моделями (Вейбулла, логарифмически нормальным, гамма-распределением и др.), а также по сравнению с нормальным параметрическим и альфа-распределением. Кроме того, диффузионные распределения представляются довольно простыми функциями, имеющими простые выражения для разнообразных оценок своих параметров, а также для всех основных показателей надежности. В частности, диффузионные распределения гораздо проще и удобнее при использовании по сравнению с такими двухпараметрическими моделями, как Вейбулла, гамма-распределение, альфа-распределение.

Необходимо заметить, что упомянутые диффузионные распределения имеют аналоги, известные в мировой печати, и распространенные под другими разными названиями. В частности, DN -распределение, полученное физиками еще в 1915 г. [59], известно в литературе как обратное гауссовское, распределение Вальда, распределение Твиди и др. DM -распределение в зарубежной литературе чаще всего называют распределением Бирнбаума-Саундерса. В связи с последним напомним, что это распределение, применительно к задачам надежности, было предложено советским ученым В.Ф.Шукайло [31] чуть ранее работы З.Бирнбаума и С.Саундерса [32]. А еще раньше на 30 лет это распределение появилось в работах советского математика С.Н.Бернштейна [60]. Так что называть его именами Бирнбаума и Саундерса несправедливо. Мы используем названия (DM - и DN -распределения), которые вытекают из самой схемы формализации этих моделей. В частности, эти функции представляют собой решения уравнения диффузии вероятностей (уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова). При этом в зависимости от монотонного или немонотонного характера реализаций физического процесса, приводящего к отказу, получают различные решения и, следовательно, различные аналитические выражения для законов распределения вероятностей. Заметим, что по своим формальным и статистическим свойствам эти распределения отличаются между собой весьма незначительно. Следует также подчеркнуть, что рассматриваемые распределения известны и используются в мировой печати как строго вероятностные модели.

Диффузионные распределения как вероятностно-физические модели надежности имеют большое преимущество перед строго вероятностными моделями в том, что их параметры могут быть оценены как на основе статистики отказов (в этом случае они рассматриваются как строго вероятностные модели), так и на основании анализа статистических характеристик физического процесса, приводящего к отказу, а также при совместном использовании статистической информации обоих типов. Как известно, решение основных задач надежности (как при априорных, так и апостериорных методах) в конечном итоге сводится к оценке параметров распределения искомой величины (наработки до отказа, на отказ, ресурс и т.д.). Следует отметить, что важнейшим фактором, способствующим решению разнообразных задач надежности при использовании диффузионных распределений, является то, что параметр формы этих распределений представляет собой обобщенную характеристику изучаемых взаимобратимых процессов (процесса разрушения и распределения наработки) – коэффициент вариации. А коэффициент вариации как обобщенная характеристика с достаточной для инженерной практики точностью может быть оценен априори на основании многочисленных (многодесятилетних) исследований как

процессов разрушений (прочности, усталости, изнашивания и др.), так и статистических данных об отказах при испытаниях и эксплуатации изделий-аналогов. Именно благодаря конкретной физической интерпретации параметров диффузионных распределений удалось на их основе решить такие важные задачи надежности, как расчет надежности систем, планирование контрольных и определительных испытаний на надежность, оценка (прогнозирование) остаточного ресурса (срока службы), расчет запасных частей, расчет долговечности электронной аппаратуры, расчет надежности типовых деталей машин на основе прочностных характеристик материалов деталей и условий нагружения во времени и другие задачи [13, 14].

Новая методология исследования надежности разработана и развивается в отделе надежности ИПММС НАН Украины в течение последних трех десятилетий. В настоящее время на основе двухпараметрических диффузионных распределений [13, 14, 35–57] достаточно разработаны методы решения всех основных задач надежности изделий (оценки надежности элементов механических и электронных изделий, технических систем) на всех жизненных циклах. При этом определяются наиболее полные характеристики надежности – функции распределения наработки (до отказа, на отказ, ресурса и т.д.), которые позволяют оценить любые показатели надежности (среднюю наработку, гамма-процентный ресурс, вероятность безотказной работы за заданный интервал наработки, остаточный ресурс и др.). Необходимо отметить, что вероятностно-физические методы оценки показателей надежности весьма эффективны в условиях наблюдения (при эксплуатации) высоконадежных объектов, в частности, оборудования АЭС, когда имеется малая статистика отказов. В такой ситуации, благодаря использованию дополнительной априорной информации о физических процессах деградации наблюдаемых объектов, представляется возможным получить оценки показателей надежности (средней наработки на отказ, вероятности безотказной работы за заданный интервал наработки и др.) при единичных отказах или даже при отсутствии отказов, если наблюдается несколько однотипных объектов (более 4). Кроме того, имеется возможность получить оценки показателей надежности некоторых объектов по измерению определяющих или диагностических параметров.

Уточнение оценок показателей надежности на всех этапах, в том числе и на этапе проектирования, объективно приведет к повышению надежности. Большой эффект дает использование диффузионных распределений в задачах планирования контрольных испытаний на надежность. Планы контроля надежности на основе диффузионных распределений являются существенно экономичнее. Для того, чтобы с требуемой достоверностью и точностью сделать заключение о том, что соответствуют или не соответствуют контролируемому уровню надежности испытываемые изделия, необходим в 1,5–2,0 раза меньший объем испытаний [13, 14]. Это означает, что внедрение планов контроля надежности на основе предлагаемого аппарата снизит затраты на испытания на 30% и более. Заметим, что этот экономический эффект только от снижения затрат на испытания. Объективно использование более строгих и точных планов приведет к повышению надежности, т.е. достижению планируемого уровня надежности. Расчет количества элементов в комплекты ЗИП на основе более адекватных моделей отказов приводит к более эффективному планированию ЗИП и обеспечению надежности технических систем в процессе длительной эксплуатации. В общем, экономический эффект от внедрения

двухпараметрических диффузионных распределений в практику решения всех задач надежности техники составит порядка одного процента от годового бюджета машиностроительной отрасли и, соответственно, порядка одного процента от бюджета экономически развитого государства.

Необходимо также подчеркнуть, что математический аппарат решения задач надежности на основе диффузионных распределений [13, 14, 36–57] приводит не только к более точным прогнозным оценкам по сравнению с традиционным математическим аппаратом, но и к решению существенно большего числа типовых задач надежности. Если на основе DN -распределения решается 25 типовых задач надежности, то на основе экспоненциального распределения только 13, из упомянутых 25 [52]. Высокая универсальность двухпараметрических диффузионных распределений позволяет решить необходимую задачу унификации методов измерений надежности элементной базы и технических систем, причем независимо от типа изделий (электронных или механических).

4. Заключение

Подытоживая результаты исследований, можно констатировать, что в настоящее время создана возможность для сквозного использования двухпараметрических вероятностно-физических моделей отказов (диффузионных распределений) при оценке надежности любых изделий машиностроительной продукции на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации. В общем, представляется, что первый этап теории и практики надежности, основанный на глобальном использовании однопараметрического экспоненциального распределения, заканчивается, и наступает следующий период, основанный на использовании двухпараметрических вероятностно-физических моделей надежности, который приводит к повышению точности оценок показателей надежности объектов и снижению затрат на обеспечение надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Status of the Reliability Technology // RAC Journal. – 1995. – Vol. 3, N 1. – P. 5–7.
2. Coppola A. The Status of the Reliability Engineering Technology // Reliability Society Newsletter. – 1997. – N 43. – P. 7–9.
3. Стрельников В.П. Состояние и перспективы технологии исследования надежности // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 11. – С. 3–8.
4. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 // RAC Journal. – 2001. – N 1. – P. 1–4.
5. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 2 // RAC Journal. – 2001. – N 2. – P. 8–10.
6. Стрельников В.П. Состояние и перспективы теории и практики надежности // Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – 2005. – Вып. 24. – С. 27–38.
7. Перроте А.И., Сторчак М.А. Вопросы надежности РЭА. – М.: Советское радио, 1976. – 185 с.
8. Сотсков Б.С. Физика отказов и определение интенсивности отказов // О надежности сложных технических систем. – М.: Советское радио, 1966. – С. 289–306.
9. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1966. – 231 с.
10. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
11. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
12. Баронс П.П. Надежность и качество механических систем / П.П. Баронс, А.В. Звиедрис, Н.К. Салениекс. – Рига: Авотс, 1982. – 85 с.
13. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
14. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
15. Основные вопросы теории и практики надежности. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 270 с.
16. Барзилович Е.Ю. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др.; Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

17. Беляев Ю.К. Надежность технических систем: [Справочник-Н17] / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
18. Надежность в машиностроении: [Справочник-Н17] / Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
19. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. – М.: Олита, 2003. – 472 с.
20. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Советское радио, 1962. – 252 с.
21. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем (теория и практика). – М.: «Европейский центр по качеству», 2002. – 470 с.
22. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ Петербург, 2006. – 704 с.
23. Стрельников В.П. Оценка ресурса изделий электронной техники // Математичні машини і системи. – 2004. – № 2. – С. 186–195.
24. Заренин Ю.Г. Надежность и эффективность АСУ / Ю.Г. Заренин, М.Д. Збырко, Б.П. Креденцер и др. – Киев: Техніка, 1975. – 368 с.
25. Соловьев А.Д. Основы математической теории надежности. – М.: Знание, 1975. – 103 с.
26. Norman V. Fuqua “Physics of Failure” – historic perspective // RAC Journal. – 1995. – Vol. 3, N 2. – P. 27–30.
27. Ken Neubeck MIL – HDBK -217 and the real // RAC Journal. – 1994. – Vol. 2, N 2. – P. 15–18.
28. Zelen M., Dannemiller M.C. The robustness of life testing procedures derived from the exponential distribution // Technometrics. – 1961. – Vol. 3, N 1. – P. 29–49.
29. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
30. Стрельников В.П. Оценка и закономерности эмпирической интенсивности отказов. – Киев: Общество «Знание УССР», 1988. – 16 с.
31. Шукайло В.Ф. Некоторые вопросы теории восстановления и усталостной надежности механических элементов // О надежности сложных технических систем. – М.: Советское радио, 1966. – С. 125–149.
32. Birnbaum Z.W., Saunders S.C. A new family of life distribution // J. Appl. Prob. – 1969. – N 6. – P. 319–347.
33. Ястребенецкий М.А. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / М.А. Ястребенецкий, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская и др.; Под ред. М.А. Ястребенецкого. – К.: Техніка, 2004. – 472 с.
34. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 605 с.
35. Стрельников В.П. Модели отказов изделий электронной техники. – Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1982. – 35 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т кибернетики; 82-35).
36. Стрельников В.П. Модели отказов механических объектов. – Киев, Общество «Знание УССР», 1982. – 20 с.
37. Стрельников В.П. Приложение теории марковских процессов к исследованию надежности скользящих электрических контактов // Приборостроение. – 1982. – Т. XXVI, №4. – С. 48–52.
38. Стрельников В.П. Новые инженерные методы априорной оценки надежности. – Киев: Общество «Знание УССР», 1986. – 20 с.
39. Стрельников В.П. Приложение теории марковских процессов к исследованию усталостной долговечности // Проблемы прочности. – 1986. – № 2. – С. 18–22.
40. Стрельников В.П. Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры // Надежность и контроль качества. – 1989. – №9. – С. 3–7.
41. Стрельников В.П. К оценке дисперсии по единичной временной реализации // Надежность и контроль качества. – 1989. – № 5. – С. 14–18.
42. Стрельников В.П. Определение ожидаемой остаточной наработки при DM-распределении // Математичні машини і системи. – 2000. – № 1. – С. 94–100.
43. Стрельников В.П. Прогнозирование остаточного ресурса изделий электронной техники // Математичні машини і системи. – 2000. – № 2, 3. – С. 163–169.
44. Стрельников В.П., Стрельников П.В. Оценка надежности по малой выборке с использованием дополнительной априорной информации // Материалы Международной конференции «Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий». – Москва: Радио и связь, 2002. – Ч. 2. – С.163–167.
45. Стрельников В.П. К оценке коэффициента вариации распределения отказов // Математичні машини і системи. – 2003. – № 1. – С. 142–146.
46. Стрельников В.П. Оценка остаточного ресурса на основе измерения диагностических параметров // Надежность. – 2003. – № 3 (6). – С. 43–48.
47. Стрельников В.П. Прогнозирование надежности электронных систем при отсутствии отказов с использованием дополнительной априорной информации // Математичні машини і системи. – 2003. – № 3, 4. – С. 226–231.
48. Стрельников В.П. Оценка регламентированного срока дальнейшей эксплуатации механического оборудования // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС». – Киев: Ин-т проблем прочности НАН Украины, 2006. – С. 98–99.
49. Стрельников В.П. Расчет надежности параллельных структур на основе аппарата функций случайных аргументов с использованием DN -распределения // Радиоэлектронные системы. – 2007. – № 2. – С. 21–25.
50. Стрельников В.П. Методы расчета надежности деталей машин при статических и циклических нагрузках // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 4. – С. 16–20.

51. Стрельников В.П. Оценка остаточного ресурса объектов на основе данных об отказах в процессе эксплуатации // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 1. – С.11–13.
52. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 43 с.
53. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования. – Введ. 01.01.96. – 39 с.
54. ДСТУ 2992-95. Изделия электронной техники. Методы расчета надежности. – Введ. 01.01.96. – 76 с.
55. ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Введ.01.01.96. – 122 с.
56. ДСТУ 3942-99. Надежность техники. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). – Ч. 2: Диффузионное распределение. – Введ.01.07.00. – 34 с.
57. ДСТУ 2504-94. Средства вычислительной техники. Отказоустойчивость и живучесть. Методы испытаний. – Введ. 01.07.95. – 45 с.
58. Острейковский В.А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
59. Schrodinger E. Zur theorie der fallund streigver suche an teilchen mit brownscher bewegung // Physikalische teitshrift. – 1915. – N 16. – P. 289–295.
60. Бернштейн С.Н. Теория вероятностей. – М.: Гостехиздат, 1946. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2007