

УДК 347.823.21

DOI 10.51955/2312-1327_2024_1_6

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КАК СВОЙСТВА КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ И ПРОДУКЦИИ

*Николай Сергеевич Херсонский,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
кандидат технических наук
генеральный директор ООО «СОЮЗСЕРТ»,
ул. Викторенко, д. 7, корпус 30
Москва, 125167, Россия
hersn@yandex.ru*

*Людмила Геннадьевна Большедворская,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
доктор технических наук, профессор кафедры БПиЖД
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125493, Россия
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Аннотация. Надежность – важнейшая характеристика любого объекта или продукта, поскольку всегда важно, чтобы то, что предлагает и поставляет поставщик, было бы качественным не только в момент приобретения, но в течение всего срока использования. В настоящее время для авиационной и аэрокосмической отраслей, военно-промышленного комплекса надежность изделий приобретают особую актуальность. В данной статье представлен обзор научных достижений в области надежности технических объектов и продукции. Безусловно, данный обзор не является всеохватывающим. Однако, рассмотрение отражает значительную часть книг, монографий и прочих материалов фундаментального характера, не потерявших своей актуальности до настоящего времени. Результаты исследования – это своего рода путеводитель по лабиринту сложнейших проблем решения задач обеспечения надежности и методов, которыми можно воспользоваться для их решения.

Ключевые слова: методы надежности, качество продукции, объекты авиационной, аэрокосмической отраслей, военно-промышленный комплекс.

ANALYSIS OF DEVELOPMENT OF STATISTICAL METHODS FOR RELIABILITY ASSESSMENT AS QUALITY PROPERTIES OF FACILITIES AND PRODUCTS

*Nikolai S. Khersonsky,
orcid.org/0000-0003-1296-7131,
Candidate of Technical Sciences
General Director of SOYUZCERT LLC,
7, building 30, Viktorenko St.
Moscow, 125167, Russia
hersn@yandex.ru*

*Ludmila G. Bolshedvorskaya,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of Flight Safety and Vital Activity
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronstadtsky boulevard, 20
Moscow, 125493, Russia
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

Abstract. Reliability is the most important characteristics of any object or product, since it is always important that what the supplier offers and supplies is of high quality not only at the time of purchase, but during the entire period of use. Currently, for the aviation and aerospace industries, for the military-industrial complex, the reliability of products is of particular relevance. This article provides an overview of scientific achievements in the field of reliability of technical facilities and products. Of course, this review is not overall. However, the consideration reflects a significant part of books, monographs and other fundamental materials that have not lost their relevance to the present. The results of the study are a kind of guide to the labyrinth of the most difficult problems of solving reliability problems and methods that can be used to solve them.

Keywords: reliability methods, product quality, objects of aviation, aerospace industries, military-industrial complex.

Введение

Первые проявления повышенного внимания к проблеме качества и надежности объектов и продукции относятся к периоду глубокой исторической давности. Предки отмечали преимущества, получаемые от качественных орудий охоты и труда, надежности и практичности хозяйственной утвари, качества и эффективности сельскохозяйственного инвентаря, способствующего стабильному выращиванию урожая. Современники не перестают удивляться и впечатляться результатами строительства египетских пирамид. Точность замеров и надежность расчетных элементов, из которых они состоят, поражают воображение.

Можно предположить, что это проявление первых зачатков статистических методов измерения, расчета, обобщения данных с целью выявления закономерностей качества и надежности объектов и ее продукции.

Зарождение статистических методов управления качеством не имеет конкретной даты, но результаты многочисленных научных исследований сходятся во мнении, что это научное направление возникло в начале XIX столетия на фоне перехода промышленного производства к принципам разделения труда, которые потребовали решения проблем взаимозаменяемости и точности производства. Это обусловлено тем, что при ремесленном способе производства продукции достижение точности готового продукта являлось весьма трудоемким и длительным процессом подгонки сопрягаемых деталей и узлов по образцам. Кроме этого, отсутствие статистических методов оценки качества продукции порождало проявление субъективности принятия решений при выполнении значительного количества вариаций и исправлений в процессе производства. Таким образом сложились объективные предпосылки для разработки критерия качества, который позволял бы ограничивать количество отклонений размеров при

массовом изготовлении деталей. В качестве такого критерия Ф.Тейлором были предложены интервалы, устанавливающие пределы отклонений параметров в виде нижних и верхних границ, называемые в настоящее время «допуском».

Впервые применение наукообразных статистических методов отмечено в 1924 году в работах У.Шухарта, который предложил применение контрольных карт для выявления несоответствия продукции посредством вычисления процента брака. У. Шухарт, являясь большим поклонником и приверженцем основных принципов качества, сформулированных Э. Демингом, предложил подход непрерывного улучшения процессов, который известен в настоящее время как «Цикл Шухарта-Деминга». Это позволило в последующих исследованиях переключить внимание производителей от традиционного подхода к управлению качеством конечного продукта на обеспечение стабильности и надежности и контроля качества процессов производства.

Значительный вклад в применение статистических методов контроля качества продукции привнесли американские ученые Э. Пирсон, Е. Фишер, Д. Нойман, разработав и обосновав в середине XX века практическую применимость основных принципов теории проверки статистических гипотез.

Нередко предлагаемые обстоятельства, в которых оказывалось общество, становились катализатором развития новых подходов к разработке и применению статистических методов. Так, например, жестокий период второй мировой войны предопределил появление методов разрушающего контроля с учетом лимитирующего фактора – количества проверяемых изделий. Несомненной удачей этого периода является появление теории последовательного анализа и принятия решений, разработанной А. Вальдом. Последующая практическая применимость данного метода доказана снижением количества ошибок в процессе проведения контроля качества по сравнению с традиционными на тот момент методами.

Огромной заслугой японских ученых в развитии статистических методов управления качеством являются научные достижения К. Исикавы и Г. Тагути. Впервые в мировой практике К. Исикава предложил нетрадиционный метод анализа причинно-следственных связей, формирующих качество продукции, который в настоящее время имеет широкомасштабное применение в различных областях и носит название «диаграмма Исикавы». Развивая идеи соотечественника, Г. Тагути впервые интегрировал принципы обеспечения качества с методами математической статистики и экономической составляющей производства, введя новое понятие функции ущерба качества, доказав тем самым, что потери качества начинают проявляться в момент отклонения номинального или заданного технической документацией параметра от фактического результата на всех стадиях проектирования, изготовления, производства и эксплуатации объектов и использования продуктов. Тем самым возникла необходимость решения задач оценки работоспособности конкретных объектов и технического состояния его элементов в зависимости от срока эксплуатации,

что послужило основой для математического развития теории статистических методов, в которых решались бы различные задачи надежности в конкретной области техники.

Надежность является одним из свойств качества продукции, которое отражает совокупность свойств, характеризующих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением¹. Требования по качеству продукции могут включать требования по надежности. Поскольку надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования².

Словосочетание «во времени» означает естественный ход времени, в течение которого осуществляется применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование объекта, а не в какой-либо конкретный интервал времени.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.

Требуемые функции и критерии их выполнения устанавливают в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной или иной документации на объект в виде набора параметров, характеризующих способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. Таким образом следует конкретизировать понятие надежность, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Аналогичным образом могут быть определены и уточнены термины.

Поэтому целью данного исследования является анализ и обобщение результатов научных достижений в области развития подходов к оценке показателей надежности как свойства качества объектов и продукции.

Материалы и методы

К наиболее значимым результатам исследований, в которых решались актуальные задачи надежности в конкретной области техники относятся работы второй половины прошлого века, содержащие методы расчетов надежности систем на различных этапах жизненного цикла продукции, а также сведения, необходимые для проведения различных видов испытаний на надежность техники [Рухин и др., 1989; Ушаков и др., 2000].

Еще в начале 1990 годов разработано и издано несколько весьма значимых изданий, одним из которых является терминологический стандарт

¹ ГОСТ 15467-79. Межгосударственный стандарт. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2009.

² ГОСТ 27.002-2015. Международный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2016.

ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения, 1990 (заменен на ГОСТ 27.002-2015). Он был разработан под руководством чл.-корр. АН СССР В.В. Болотина, возглавлявшего в тот момент рабочую группу по подготовке нового терминологического стандарта «Надежность машин». Основные понятия, положения и требования стандарта явились результатом многочисленных дискуссий коллектива разработчиков и представителей различных отраслей науки и техники. Тем не менее, стандарт представлял определенный компромисс взглядов специалистов из различных областей, поскольку надежность – термин исключительно общий, имеющий широкомасштабное применение. Поэтому, в этот период отмечаются попытки предпринимательского и коммерческого характера дополнить и пересмотреть его содержание. В связи с этим стоит обратить внимание на работу, обеспечивающую потребителям возможность установить связь между показателями надежности и гарантийными показателями на изделие³.

Значительным вкладом в развитие принципов оценки надежности как свойства качества явились результаты работ по стандартизации моделей отказов [Демидович, 1994; Стрельников, 1997]. Анализ подходов обоих авторов показал, что под стандартизацией моделей отказов следует понимать создание стандарта, который будет регламентировать некоторое число функций распределения (ФР) наработки до отказа в виде универсальных (стандартных) моделей надежности (МН). Однако, разница во взглядах авторов состояла в противоречивом использовании различных математических формулировок для «обобщенных» МН. На этом основании был сделан вывод, что идея «универсальной модели отказов» является весьма спорной, усложняющей ее практическую применимость [Шпер, 1997].

В 1997 г. в журнале «Надежность и контроль качества» был опубликован большой обзор известного специалиста в области конструкционной и прочностной надежности [Коновалов, 1997]. Автор подчеркивает, что с ростом единичных мощностей и энерговооруженности машин и механизмов, имеющих практическое значение во всех отраслях промышленности (включая такие ответственные, как атомные электростанции (АЭС), летательные аппараты, транспортные средства и т.д.), усилилось несоответствие между требованиями к показателям надежности и реальной надежностью машин, что ведет к прямой угрозе безопасности людей и окружающей среде.

Поэтому, эпохальными событиями XX века можно считать зарождение серии стандартов ГОСТ 27..., практическая применимость которых имеет актуальное значение в настоящее время, приведем для примера некоторые из них:

ГОСТ 27.002-89 – Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения (заменен на ГОСТ 27.002-2015).

³ Аронов И. З. Методические рекомендации по установлению сроков гарантии, службы (годности) на товары народного потребления в соответствии с требованиями Закона Российской Федерации «О защите прав потребителей» // В сб. Методические рекомендации по исполнению Закона Российской Федерации «О защите прав потребителей». М.: АО «Сертификация в бизнесе и торговле», 1993. С. 22-35.

ГОСТ 27.003-90 – Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности (заменен на ГОСТ 27.003-2016).

ГОСТ 27.004-85 – Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.

ГОСТ 27.202-83 – Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.

ГОСТ 27.203-83 – Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.

ГОСТ 27.204-83 – Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности.

ГОСТ 27.301-95 – Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

ГОСТ 27.310-95 – Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

Дискуссия

Начало XXI века ознаменовано публикацией серии работ, посвященных проблемам стандартизации в области надежности, одна из которых заслуживает особого внимания в формате данного исследования. Это публикация [Демидович, 2002], посвященная проблеме гармонизации терминов по надежности, используемых в Российской Федерации с терминами, разрабатываемыми Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) по проблеме «Надежность». В частности, предлагается определять надежность как «Собирательный термин, применяемый для описания свойств готовности, безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта». На этом основании авторы [Белов и др., 2003], рассматривая взаимосвязь понятий надежности и безопасности, вводят термины по безопасности с позиций расчета вероятностей наступления соответствующих событий, т.е. с позиций надежности.

Хорошо известный специалист опубликовал в 2000 году книгу по надежности сложных систем, которая в основном посвящена логико-вероятностным методам анализа надежности [Рябинин, 2000].

Результаты исследований и научных достижений многочисленных авторов были опубликованы в многотомной энциклопедии «Машиностроение», посвященной надежности машин [Энциклопедия «Машиностроение»..., 2021].

В 2022 году очень давно работающий в области надежности машин автор выпустил новое издание своей книги, посвященной параметрической надежности, расчету и прогнозированию отказов при заданных моделях старения выходных параметров машин [Проников, 2002].

В 2023 году был выпущен учебник по надежности для студентов ВУЗов, [Острейковский, 2023]. Но, при всех его достоинствах, стоит обратить

внимание на другую книгу с участием того же автора, вышедшую в 1993 году и посвященную методам расчета надежности ядерных энергетических установок [Антонов и др., 1993]. В ней довольно удачно сочетаются аккуратность математического аппарата, практические данные и примеры расчетов, и, кроме того, в отличие от традиционных книг по надежности, в неё включены некоторые относительно новые направления анализа и обеспечения надежности, например, байесовское оценивание надежности ядерных энергетических установок, непараметрические методы оценивания (бутстреп – процедура) и т.п.

Достойным дополнением к опубликованным изданиям является публикация, посвященная как теоретической базе последовательных планов контроля, так и полученным результатам, вошедшим в ряд стандартов по испытаниям [Ярлыков, 2004].

Ещё один хорошо известный автор представил усовершенствованный вариант своего пособия по надежности автоматизированной системы управления (АСУ), которое теперь стало называться пособием по надежности аппаратно-программных комплексов⁴.

В дополнение к этому весьма небольшому перечню книг можно добавить книгу, целиком посвященную применению байесовских методов в надежности [Савчук, 1989]. Книга ликвидирует определенный пробел в русскоязычной литературе по данной тематике. Достаточно обратить внимание на список цитируемой автором литературы, который состоит из 247 наименований. Однако она все-таки рассчитана не на инженера по надежности, а на специалиста по статистическим методам. Тем не менее, и такая направленность важна для развития отечественных работ в области надежности.

Особое внимание следует уделить результатам научных исследований в области надежности систем, одним из которых является работа, посвященная оценке надежности компонентов системы, значительная часть оценок которых имеют эвристический характер [Ушаков и др., 2000].

Результаты исследования, подготовленные группой авторов и представляющие собой обмен опытом в области системы гарантийного обслуживания, представляют модель для оперативного выполнения ремонтов посредством прогноза числа возвратов [Гианулис, 2000].

Задачам оценки надежности при техническом обслуживании техники и оборудования посвящены несколько работ, заслуживающих внимания [Ушаков и др., 2002а; Ушаков и др., 2002б]. Достоинством результатов исследования является то, что авторы рассмотрели интересную задачу об оптимизации территориально-распределенной системы технического обслуживания при условии, что качество обслуживания описывается средним временем ожидания ответа на запрос и временем обслуживания после

⁴ Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов 654600 «Информатика и вычислит. Техника» и направлению подгот. бакалавров , 552800 «Информатика и вычислит. Техника» / Г.Н. Черкесов ; Г.Н. Черкесов. СПб. [и др.] : Питер, 2005. 478 с. EDN QMOAEN.

получения ответа. При этом, чтобы вероятность успешной замены с первого раза отказавшей детали на исправную была бы максимальной, авторы не только указали способ решения этой задачи, но и предложили при некоторых весьма реальных допущениях очень простое её решение посредством упорядочения всех запасных частей по убыванию их значимости и востребованности, практически применив известный метод Парето.

Процесс моделирования и оценки эффективности в системах обусловлены сложностью, высоким уровнем материальных затрат и длительностью проводимых экспериментов. На этом основании результаты работы, рассматривающей проблему оценки эффективности сложных систем на примере спутниковой коммуникационной системы Globalstart, опубликованную более 20 лет назад, имеют большое практическое применение для современности [Ушаков и др., 2002а; Ушаков и др., 2002б].

Оптимизацией числа запасных элементов оборудования заняты и авторы работы, в которой речь идет об элементах, важных для безопасности атомной электростанции (АЭС). Предложив метод анализа на основе нестационарных марковских цепей, авторы получили практический вывод, что при эксплуатации системы в течение года оптимальное число запасных элементов равно единице, а при эксплуатации от 2 до 10 лет – оно равно двум [Антонов и др., 2001].

Новое понятие в теории надежности представлено в работе, которая рассматривает отказоустойчивость функционально-распределенных систем, где под отказоустойчивостью автор понимает оценку максимально возможного числа отказов, ещё не приводящего к отказу системы, и условную вероятность сохранения работоспособности системы при условии возникновения k отказов её компонент. Недостатком работы явился её сугубо теоретический характер, который был позднее дополнен результатами исследования, направленного на решение проблемы оценки коэффициента сохранения эффективности применительно к системам вычислительной техники. В отличие от предыдущей работы, на этот раз автор приводит достаточное число примеров расчетов по предлагаемой им методике решения данной задачи [Богатырев, 2001а; Богатырев, 2001б].

Решению чрезвычайно актуальной задачи оценки надежности территориальной системы электроснабжения, применяя теорию графов, посвящена работа автора, который вычислил вероятности перехода системы из работоспособного состояния в неработоспособное для определенных топологических структур, и с учетом некоторого набора состояний каждого из элементов. Среди допущений, положенных в основу модели, есть такие, какие заведомо не выполняются при развитии крупных энергетических аварий, что является недостатком данного подхода и отсутствием практической применимости модели к ситуациям типа недавнего энергетического кризиса [Челядин, 2003].

В связи с этим, заслуживают внимания результаты работ, направленных на обсуждение проблем надежности электропитания и надежности системы с функциональной избыточностью определенного типа, когда речь идет о

системе, включающей n одинаковых модулей, каждый из которых выполняет n одинаковых по трудности функций. Работа изобилует формулами из области вероятностной логики, но результат всех этих упражнений довольно прост: такая система по надежности уступает системе с двухкратным резервированием, но превосходит систему без резервирования [Замыслов и др., 2002].

С одной стороны, коммуникационные сети, как правило, высоконадежны, но время от времени может возникнуть внезапный отказ, создающий ряд проблем, решение которых представлено в работе, посвященной прогнозированию таких отказов. Достоинством работы является большое количество примеров расчетов и результаты моделирования. Кроме того, представлен широкий обзор критических замечаний других специалистов [Becker et al., 1998]. В работе авторов предпринята попытка проанализировать надежность систем с помощью модели роста надежности применительно к надежности оператора и взаимодействию человека с машиной, что позволило сделать ряд выводов относительно практики подготовки операторов и системы проектирования интерфейсов [Pasquini et al., 2001].

Разработка систем оптимального обслуживания изношенных объектов, а также прогнозирования эксплуатационных отказов восстанавливаемых систем представлены в работах, заслуживающих внимания в формате данного исследования и обстоятельств, вызванных санкционными ограничениями и их последствиями. Группа авторов рассматривают проблему оценки стационарной готовности систем, имеющих различные типы простоев, включая случаи внеплановых простоев и простоев запланированного ожидания. Все оценки сравниваются с результатами, полученными при допущении об экспоненциальном распределении времен ожиданий и восстановлений [Lee-Ing Tong et al., 2005; Mathew, 2004; System availability..., 2002].

Результаты зарубежного опыта легли в основу работ, опубликованных отечественными исследователями, в одной из которых анализируется надежность систем резерва при условии, что вместо обычного допущения об известных отказах элементов, располагая только информацией о нижних и верхних границах некоторых событий, можно провести оценку влияния и использования доступной информации на получаемые оценки качества и надежность объектов, достоверность которой подтверждается несколькими примерами расчетов по предложенной модели [Utkin, 2003].

Результаты

Судя по проведенному анализу результатов исследований отечественных и зарубежных авторов, в настоящее время обычными испытаниями на надежность – контрольными и определительными занимается ограниченное количество теоретиков и практиков, поскольку значительная часть основных проблем озвучены, решены и описаны более десяти лет назад. Тем не менее, следует несколько работ, заслуживающих внимания. Одной из

которых является работа, в которой предложен новый подход к статистическому контролю качества, включая и контроль надежности. Этот подход был назван автором «принципом распределения приоритетов». В этом подходе удастся существенно снизить значения рисков α и β , что в свою очередь позволяет заметно уменьшить объем испытаний (основная проблема традиционных планов испытаний). Однако, это достигается принятием определенной процедуры согласования планов испытаний плюс наличие третьей стороны, принимающей решения в спорных ситуациях. Представляется, что этот подход малоперспективен именно из-за наличия третьей стороны и отсутствия четкого алгоритма проведения испытания [Статистический контроль..., 1991].

В связи с этим, существенным дополнением к исследованию является работа, отражающая обзор проводимых экспериментов на оценку надежности оборудования, включая алгоритм проведения сравнительного анализа планов с фактическими достижениями. Сухой остаток работы выглядит следующим образом: в случае наиболее распространенных значений рисков – α и $\beta \in [0,001; 0,05]$ – наиболее эффективны критерии Лордена и Павлова, причем при несимметричных рисках предпочтительнее использовать критерий Лордена [Гродзенский, 2001а; Гродзенский, 2001б].

Проведя сравнение последовательных планов испытаний при том же наборе критериев, но в условиях, когда моменты отказов распределены в соответствии с экспоненциальным или вейбулловским распределениями, автором сформулированы выводы. В частности, если α и $\beta \geq 0,05$, то оптимальны планы с параболическими границами браковки [Гродзенский, 2001а; Гродзенский, 2001б].

В основном весь мир вот уже много лет пытается решить проблему объема испытаний путем так называемых ускоренных испытаний (УИ) на надежность. Помимо проблемы собственно объема испытаний, УИ позволяют решить и другую важную проблему: максимально быстрое получение информации об отказах новых высоконадежных изделий и разработок. Время разработки и вывода продукции на рынок в 21 веке – важнейший параметр конкурентоспособности, и УИ – один из способов её повышения. Суть проблемы, очень кратко, состоит в следующем.

Пусть для какого-то изделия или системы задано значение произвольного показателя надежности (ПН). Для определенности изложения возьмем в качестве ПН вероятность безотказной работы на заданное время (t_0) – $R(t_0)$. Чтобы определить этот ПН, надо провести испытания или эксплуатацию в течение некоторого времени t_0 . Если же необходимо оценить величину $R(t_0)$ за время $t^* < t_0$, то это и будет означать проведение и оценку УИ на надежность. Термин «ускоренные» в данном случае означает «требующие меньше времени». Очевидно, что уменьшить время, необходимое для получения информации о надежности, можно, либо сокращая время, когда изделие/система не работает, либо ускоряя процессы, ведущие к отказам, либо объединяя оба эти способа тем или иным образом. При этом в отечественной литературе сложилась традиция употреблять термин УИ как более общий и

относящийся к любому из вариантов ускорения. Если же УИ осуществляются за счет ускорения процессов возникновения отказов, то говорят о форсированных испытаниях, поскольку ускорение процессов достигается путем приложения к изделиям/системам воздействий, превышающим их нормальные рабочие нагрузки/воздействия. Поэтому в данной работе под УИ в основном понимаются именно форсированные испытания, поскольку проблема ускорения за счет уменьшения нерабочего времени достаточно тривиальна.

Проблема, которая возникает, очевидна: можно ли оценить искомое значение $R(t_0)$ за время $t^* < t_0$, и если можно, то как перейти от $R(t^*)$ к $R(t_0)$? Решение этой проблемы требует ответа на два вопроса:

- сохраняются ли одни и те же причины и механизмы отказов (ПМО) в нормальных и ускоренных режимах;
- как пересчитать ПН от ускоренных режимов к нормальным, и наоборот?

На интуитивном уровне понятно: если ПМО не сохраняются при ужесточении режимов испытаний (иногда это называют проблемой автомобильной УИ), тогда никакие предсказания невозможны, и, более того, бессмысленны. С другой стороны, на современном уровне развития науки и техники очень редко известны точные ПМО реальных изделий и систем. Поэтому, начиная с самых ранних работ по УИ, как правило, используется следующее допущение: сохранение одних и тех же ПМО эквивалентно сохранению функции распределения (ФР) отказов во времени. Под сохранением ФР понимается следующее. Пусть ФР для нормального режима может быть описана некоторой функцией времени $F_0(t/w_0)$, где t – это время, а через w_0 обозначена совокупность параметров нормального режима, влияющих на функцию F_0 . Аналогичную функцию для ускоренного режима обозначим $F^*(t/w^*)$, где через w^* обозначена совокупность параметров ускоренного режима, влияющих на F^* . Тогда о сохранении ФР говорят в том случае, когда $F_0(t/w_0)$ может быть выражена через $F^*(t/w^*)$:

$$F_0(t/w_0) = F^*(g(t)/w^*), \quad (1)$$

где $g(t)$ – некоторая функция преобразования времени, зависящая в том числе и от параметров режимов испытаний.

Наиболее распространены функциональные модели УИ, т.е. такие модели надежности (МН), когда ФР считается известной (например, соответствует одному из нижеследующих распределений: экспоненциальное, нормальное, логнормальное, Вейбулла, Гумбеля, обобщенное гамма, Бирнбаума-Сандерса и т.д.). Далее постулируется, что в ускоренных режимах форма распределения не меняется (т.е. параметр формы не зависит от нагрузки), а оно лишь смещается по оси времени, оставаясь подобным самому себе. Это подобие лучше всего проявляется, когда ФР наносят на вероятностную бумагу соответствующего распределения. Поскольку в этом

случае ФР изображается прямой линией, то обычно принимают, что ФР в нормальном и ускоренном режимах параллельны, а расстояние между ними зависит от так называемого коэффициента ускорения (КУ). Введение КУ в этом случае вполне оправданно. Что касается зависимости КУ от параметров режимов, то наибольшей популярностью во всем мире пользуются следующие модели: Аррениуса, Эйринга и обратной степени. Полнее всего материалы о КУ для разных МН и для очень широкого спектра самых разных объектов содержатся в книге Нельсона [Nelson, 1990]. Из русскоязычных публикаций последних лет стоит отметить следующие. Статистические проблемы прогнозирования надежности по результатам УИ анализируются в статье, которая рассматривает проблему расчета числа циклов УИ применительно к циклическому режиму работы объекта [Веснин, 1995; Каминский, 1990]. Критический обзор термодинамических МН содержится в обзоре [Шпер, 1992], описывающем результаты реальных УИ телевизоров и аналогичных устройств. Это – практический пример ускорения за счет повышения частоты включено-выключено. Приведено подробное описание режимов УИ, так что данная работа может быть полезна при планировании аналогичных испытаний аппаратуры и/или аналогичных объектов.

Хотя работа [Рыньков, 1996] появилась заметно позже, эти МН не могут быть опровергнуты и, во всяком случае, их универсальная применимость весьма сомнительна.

Чисто практические рекомендации по УИ отечественных механических часов на долговечность описаны в работе, где показано, что ускорение осуществлялось за счет непрерывной заводки часов, причем авторам удалось получить КУ, равный 319, сократив обзор данных о ПН вместо 10 лет до 3 недель [Кузнецов, 2000].

Продолжая свои исследования в области моделей расходования ресурса, отечественные авторы переориентировались на изучение теоретического вида возможных траекторий параметров в процессе испытаний. В этой связи значительная часть работ построены так, что допущения, положенные в их основу, не могут быть опровергнуты, и это существенно снижает их практическую ценность [Карташов, 1998]. В отдельных работах реализуются попытки развить известную МН, называемую в отечественной литературе «Физическим принципом Седякина» [Смагин, 1999; Смагин 1998]. Стоит заметить, что «физический принцип Седякина», так же, как и «принцип наследственности Карташова» эквивалентны тому подходу, который используется зарубежными исследователями, начиная с работ Сингпурвалла, Нельсона и др., и который, по сути, сводится к формуле (1).

Из зарубежных работ по УИ следует отметить, прежде всего, книгу [McLean, 2000]. Эта книга может рассматриваться как определенная веха в развитии подходов к УИ, что видно даже из её названия. В нем появились новые аббревиатуры, которых не было в старой литературе по надежности. Итак, вот они (в моем переводе):

HALT – Highly Accelerated Life Tests – сильно ускоренные испытания на долговечность;

HASS – Highly Accelerated Stress Screen – сильно ускоренная отбраковка под нагрузкой;

HASA – Highly Accelerated Stress Audit – сильно ускоренный аудит под нагрузкой.

Отличие просто УИ от сильно УИ в том, что первые предлагается использовать для анализа проблем и прогнозирования ПН, а вторые – только для обнаружения проблем надежности, и задача оценки ПН по их результатам не ставится. То же относится ко второй аббревиатуре, а третья введена для описания тех подтверждающих действий, какие мы предприняли для устранения проблем надежности, обнаруженных при HALT и HASS. Кроме этого, эти испытания, конечно же, имеют своих многочисленных предшественников в предыдущие годы, с библиографией которых лучше всего ознакомиться по книге.

Вообще надо отметить, что основное внимание зарубежных исследователей обращено на так называемые ступенчатые УИ (Step-Stress Accelerated Life Tests). Вот несколько важных работ в этом направлении.

Ускоренные ступенчатые деградационные испытания предложены в статье [Sheng-Tsaing Tseng, 2000]. Также деградационным УИ посвящены работы [Baldwin et al., 1999; Guangbin Yang et al., 2002], причем в [Замыслов и др., 2002] обсуждается проблема ускоренных коррозионных испытаний аэрокосмических материалов, а в [Guangbin Yang et al., 2002] обсуждаются испытания с ужесточенными критическими значениями параметров.

В [Khamis, 1996] выполнено сравнение между испытаниями с постоянным уровнем нагрузки и ступенчатыми испытаниями в случае, когда отказы распределены по закону Вейбулла. Как и следовало ожидать, ступенчатые испытания оказываются предпочтительными. Чуть позже тот же автор в совместной с Дж. Хиггинсом работе предложил альтернативную МН для обработки данных ступенчатых УИ [Khamis et al., 1999]. Впрочем, как показано в [Haiyan Xu et al., 2003], это просто специальный случай обычной модели ступенчатых испытаний. Авторы [Bagdonavicius et al., 2002] применили модель пропорциональных интенсивностей (см. об этой модели в [Кокс и др., 1988]) для анализа результатов ступенчатых УИ и разработали новую модель, объединившую модель пропорциональных интенсивностей и модель кумулятивного накопления повреждений. МН, использующая обратное Гауссово распределение для планирования последовательных УИ, предлагается в работе [Edgeman et al., 1997].

Одним из авторов этой статьи – Херсонским Н.С. более 15 лет назад была предложена оригинальная модель разработки и действия стандартов предприятия на примере Руководства по качеству (РК) и других документов посредством введения интерактивных ссылок на все стандарты и нормативные документы, приведенные в РК. По мнению автора, РК должно было бы иметь базу стандартов и нормативных документов, в которых отдельные системные стандарты, такие как ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и др. наделены интерактивными ссылками на актуализированные стандарты и документы.

Росстандарт утвердил первый предварительный национальный стандарт на SMART стандарты – ПНСТ 864-2023 «Умные «SMART» стандарты. Общие положения. «Умный «SMART» стандарт характеризуется как совокупность данных, содержащихся в документе по стандартизации, представленных в машиночитаемом, машиноинтерпретируемом, машинопонимаемом формате.

В результате проведенного исследования не были найдены «Умные «SMART» по надежности ни в России, ни за рубежом, но есть надежда, что этот процесс затронет разработку таких стандартов по надежности.

Заключение

Результаты проведенного исследования, целью которого явилось проведение анализа и обобщение результатов научных достижений в области развития подходов к оценке показателей надежности как свойства качества объектов и продукции, позволили выделить ряд первостепенных направлений по оценке надежности, которые могут представлять интерес для широкого круга специалистов.

Практически все методы оценки параметров надежности не потеряли своей значимости, тем не менее, в настоящее время обычными контрольными и определительными испытаниями на надежность занимается ограниченное количество теоретиков и практиков. Одним из которых предложен новый подход к статистическому контролю качества, включая и контроль надежности. Этот подход был назван автором «принципом распределения приоритетов». В этом подходе удастся существенно снизить значения рисков и заметно уменьшить объем испытаний, что является одной из основных проблем традиционных планов испытаний.

Особое внимание следует обратить на проведение ускоренных испытаний на надежность. Среди актуальных и первостепенных задач для эффективности проведения ускоренных испытаний следует выделить задачи определения оптимального объема испытаний и создание условий оперативного получения информации об отказах новых высоконадежных изделий и разработок.

В настоящее время как в России, так и за рубежом авторы не обнаружили «Умные «SMART» стандарты по надежности. В России этот процесс находится на начальной стадии. Будем надеяться, что качество и надежность будут одними из первых для разработки «Умных «SMART» стандартов.

Библиографический список

- Антонов А. В.* Оптимизация числа запасных элементов оборудования, важных для безопасности АЭС / А. В. Антонов, А. В. Пляскин, В. А. Чепурко // Методы менеджмента качества. 2001. № 8. С. 27-30.
- Антонов А. В.* Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. М.: Энергоатомиздат. 1993. 368 с.
- Белов В. П.* О понятиях «надежность» и «безопасность» технических систем с позиций разработчиков / В. П. Белов, А. Д. Голяков, С. Я. Старков // Методы менеджмента качества. 2003. № 10. С. 46-49.

- Богатырев В. А.* Отказоустойчивость функционально-распределенных систем // Методы менеджмента качества. 2001а. № 3. С. 34-37.
- Богатырев В. А.* Оценка коэффициента сохранения эффективности отказоустойчивых систем из многофункциональных модулей // Методы менеджмента качества. 2001б. № 9. С. 29-33.
- Веснин В.* Метод планирования циклических форсированных испытаний // Надежность и контроль качества. 1995. № 3. С. 3-8.
- Гианулис Л.* Прогноз ожидаемого числа возвратов отказавшей продукции при массовом производстве. На примере портативных телефонов // Методы менеджмента качества. 2000. № 11. С. 38-41.
- Гродзенский С. Я.* Последовательный контроль надежности изделий по количественным признакам // Методы менеджмента качества. 2001а. № 7. С. 31-34.
- Гродзенский С. Я.* Рационализация контрольных испытаний на надежность // Методы менеджмента качества. 2001б. № 1. С. 31-36.
- Демидович Н. О.* Гармонизация терминологии в области надежности // Методы менеджмента качества. 2002. № 10. С. 43-47.
- Демидович Н. О.* Стандартизация модели отказов // Надежность и контроль качества. 1994. № 9. С. 35-64.
- Замыслов М. А.* Оценка надежности системы с функциональной реконфигурацией / М. А. Замыслов, Е. М. Замыслов // Методы менеджмента качества. 2002. № 6. С. 36-39.
- Каминский М. П.* Непараметрическое прогнозирование квантилей времени безотказной работы по результатам испытаний в форсированных режимах // Надежность и контроль качества. 1990. № 7. С. 3-7.
- Карташов Г. Д.* Марковские модели прогнозирования надежности // Надежность и контроль качества. 1998. № 12. С. 33-36.
- Кокс Д. Р.* Анализ данных типа времени жизни [пер. с англ.] / Д. Р. Кокс, Д. Оутс. М.: Финансы и статистика, 1988. 191с.
- Коновалов Л. В.* Роль и приоритетные направления конструкторской надежности машин при современных тенденциях машиностроения // Надежность и контроль качества. 1997. № 5. С. 3-17.
- Кузнецов К. А.* Ускоренные испытания наручных механических часов на долговечность // Методы менеджмента качества. 2000. № 8. С. 31.
- Острейковский В. А.* Теория надежности. М.: Высшая школа, 2023. 463 с.
- Проников А. С.* Параметрическая надежность машин. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с. EDN TIRYZL.
- Рухин А. Л.* Обзор советских работ по надежности / А. Л. Рухин, Х. К. Хсиех // Надежность и контроль качества. 1989. № 2. С. 3-25.
- Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. М.: Политехника, 2000. 248 с.
- Савчук В. П.* Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 322 с.
- Смагин В. А.* Об одной модели форсированных испытаний // Надежность и контроль качества. 1999. № 4. С. 46-48.
- Смагин В. А.* Физико-вероятностные модели прогнозирования надежности изделий на основе форсирования испытаний // Надежность и контроль качества. 1998. № 4. С. 15-23.
- Статистический контроль качества продукции на основе принципа распределения приоритетов / В. А. Лapidус, М. И. Розно, А. В. Глазунов и др. М.: Финансы и статистика, 1991. 224 с.
- Стрельников В. П.* О стандартизации модели отказов // Надежность и контроль качества. 1997. № 3. С. 26-40.
- Ушаков И. А.* Оценка надежности элементов по результатам испытаний систем / И. А. Ушаков, С. Вайзе // Методы менеджмента качества. 2000. № 8. С. 26-27.

- Ушаков И. А. Расчет номенклатуры запчастей для передвижных ремонтных мастерских / И. А. Ушаков, В. Пушер // Методы менеджмента качества. 2002а. № 4. С. 41-42.
- Ушаков И. А. Территориально-распределенная система технического обслуживания / И. А. Ушаков, В. Пушер // Методы менеджмента качества. 2002б. № 2. С. 32-36.
- Челядин В. Л. Оценка надежности территориальной системы электроснабжения / В. Л. Челядин // Методы менеджмента качества. 2003. № 1. С. 44-47.
- Шнер В. Л. О стандартизации модели отказов // Надежность и контроль качества. 1997. № 10. С. 40-48.
- Шнер В. Л. Проблема ускоренных испытаний изделий электроники и радиоэлектроники. Современное состояние // В сб. «Качество и надежность изделий». М.: «Знание». №5(21). 1992. С. 79-120.
- Энциклопедия «Машиностроение». Том IV-3. «Надежность машин» / под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 2021. 592 с.
- Ярлыков Н. Е. Повышение эффективности контроля надежности. М.: Радио и связь, 2004. 151 с.
- Bagdonavicius V. B. Parametric inference for step-stress models / V. B. Bagdonavicius, L. Gerville-Reache, M. S. Nikulin // IEEE Trans. Reliab. 2002. Vol. 51, № 1, pp. 27-31.
- Baldwin K. R. Accelerated corrosion tests for aerospace materials: current limitations and future trends / K. R. Baldwin, C. J. E. Smith // Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal. 1999. Vol. 71, № 3. pp. 239-244.
- Becker R. A. Events Defined by Duration and Severity, With an Application to Network Reliability / R. A. Becker, L. Clark, D. Lambert // Technometrics. 1998. Vol. 40, № 3. pp. 177-189. Discussion: pp. 190-194.
- Edgeman R. L. Sequential analysis of accelerated life model / R. L. Edgeman, D. K. J. Lin // International Journal of Quality and Reliability Management. 1997. Vol. 14, № 6. pp. 598-605.
- Guangbin Yang Accelerated degradation-tests with tightened critical values / Yang Guangbin, Yang Kai // IEEE Trans. Reliab. 2002. Vol. 51, № 4. pp. 463-468.
- Haiyan Xu Commentary: the Khamis/Higgins model / Xu Haiyan, Tang Yincui // IEEE Trans. Reliab. 2003. Vol. 52, №1. pp. 4-6.
- Khamis I. H. An alternative to the Weibull step-stress model / I.H. Khamis, J.J. Higgins // International Journal of Quality and Reliability Management. 1999. Vol. 16, № 2. pp. 158-165.
- Khamis I. H. Comparison between constant and step-stress tests for Weibull models // International Journal of Quality and Reliability Management. 1996. Vol. 14, № 1. pp. 74-81.
- Lee-Ing Tong. Forecasting field failures data for repairable systems using neural networks and SARIMA / Tong Lee-Ing, Liang Yi-Hui // International Journal of Quality and Reliability Management. 2005. Vol. 22, № 4. pp. 410-420.
- Mathew S. Optimal inspection frequency: A tool for maintenance planning/forecasting // International Journal of Quality and Reliability Management. 2004. Vol. 21, № 7. pp. 763-771.
- McLean H. W. HALT, HASS & HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2000. 152 p.
- Nelson W. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses. N.Y.: John Wiley and Sons, 1990. 605 p.
- Pasquini A. Reliability analysis of systems based on software and human resources / A. Pasquini, G. Pistolesi, A. Rizzo // IEEE Trans. Reliab. 2001. Vol. 50, №4. pp. 337-345.
- Sheng-Tsaing Tseng. Step-Stress Accelerated Degradation Analysis For Highly Reliable Products // Journal of Quality Technology. 2000. Vol. 32, № 3. pp. 209-216.
- System availability with non-exponentially distributed outages / Cao Yonghuan, Sun Hairong, K.S. Trivedi, J.J. Han // IEEE Transactions on Reliability. 2002. Vol. 51, № 2. pp. 193-198.
- Utkin L. V. Imprecise reliability of cold standby systems // International Journal of Quality and Reliability Management. 2003. Vol. 20, № 6. pp. 722-739.

References

- Antonov A. V., Ostreikovskiy V. A. (1993). Evaluation of reliability characteristics of nuclear power plant elements and systems by combined methods. Moscow: *Energoatomizdat*, 1993. 368 p. (in Russian)
- Antonov A. V., Plyaskin A. V., Chepurko V. A. (2001). Optimization of the number of spare elements of equipment important for NPP safety. *Quality management methods*. 8: 27-30. (in Russian)
- Bagdonavicius V. B., Gerville-Reache L., Nikulin M. S. (2002). Parametric inference for step-stress models. *IEEE Trans. Reliab.* 51(1): 27-31.
- Baldwin K. R. Smith C. J. E. (1999). Accelerated corrosion tests for aerospace materials: current limitations and future trends. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*. 71(3): 239-244.
- Becker R. A., Clark L., Lambert D. (1998). Events Defined by Duration and Severity, With an Application to Network Reliability. *Technometrics*. 40(3): 177-189. Discussion: pp. 190-194.
- Belov V. P., Golyakov A. D., Starkov S. Ya. (2003). On the concepts of «reliability» and «safety» of technical systems from the standpoint of developers. *Quality management methods*. 10: 46-49. (in Russian)
- Bogatyrev V. A. (2001a). Fault tolerance of functional-distributed systems. *Quality management methods*. 3: 34-37. (in Russian)
- Bogatyrev V. A. (2001b). Evaluation of efficiency preservation factor of fault-tolerant systems from multifunctional modules. *Quality management methods*. 9: 29-33. (in Russian)
- Chelyadin V. L. (2003). Reliability assessment of territorial power supply system. *Quality management methods*. 1: 44-47. (in Russian)
- Cox D. R., Oates D. (1988). Analysis of life-time type data [transl. from Eng.]. Moscow: *Finance and Statistics*, 1988. 191 p.
- Demidovich N. O. (1994). Standardization of Failure Model. *Reliability and Quality Control*. 9: 35-64. (in Russian)
- Demidovich N. O. (2002). Harmonizing Terminology in the Field of Reliability. *Quality Management Methods*. 10: 43-47. (in Russian)
- Edgeman R. L., Lin D. K. J. (1997). Sequential analysis of accelerated life model. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 14(6): 598-605.
- Encyclopedia «Engineering» Tom IV-3. «Machine Reliability» / under general. red. V. V. Klyueva. Moscow: *Mechanical engineering*, 2021. 592 p. (in Russian)
- Gianoulis L. (2000). Forecast of the expected number of returns of failed products during mass production. On the example of portable phones. *Quality management methods*. 11: 38-41. (in Russian)
- Grodzensky S. Ya. (2001a). Consistent control of product reliability by quantitative characteristics. *Quality management methods*. 7: 31-34. (in Russian)
- Grodzensky S. Ya. (2001b). Rationalization of control tests for reliability. *Quality management methods*. 1: 31-36. (in Russian)
- Guangbin Yang, Kai Yang. (2002). Accelerated degradation-tests with tightened critical values. *IEEE Trans. Reliab.* 51(4): 463-468.
- Haiyan Xu, Tang Yincai. (2003). Commentary: the Khamis/Higgins model. *IEEE Trans. Reliab.* 52(1): 4-6.
- Kaminsky M. P. (1990). Non-parametric prediction of fault-free operation time quantiles based on the results of tests in forced modes. *Reliability and quality control*. 7: 3-7. (in Russian)
- Kartashov G. D. (1998). Markovsky reliability prediction models. *Reliability and quality control*. 12: 33-36. (in Russian)
- Khamis I. H. (1996). Comparison between constant and step-stress tests for Weibull models. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 14(1): 74-81.
- Khamis I. H., Higgins J. J. (1999). An alternative to the Weibull step-stress model. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 16(2). 158-165.
- Konovalov L. V. (1997). Role and priority areas of structural reliability of machines in modern trends in mechanical engineering. *Reliability and quality control*. 5: 3-17. (in Russian)

- Kuznetsov K. A. (2000). Accelerated durability tests of mechanical wristwatches. *Quality management methods*. 8: 31. (in Russian)
- Lapidus V. A., Rozno M. I., Glazunov A. V., et al. (1991). Statistical quality control of products based on the principle of prioritization. Moscow: *Finance and Statistics*, 1991. 224 p.
- Lee-Ing Tong, Yi-Hui Liang. (2005). Forecasting field failures data for repairable systems using neural networks and SARIMA. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 22(4): 410-420.
- Mathew S. (2004). Optimal inspection frequency: A tool for maintenance planning/forecasting. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 21(7): 763-771.
- McLean H. W. (2000). HALT, HASS & HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques. Milwaukee: *ASQ Quality Press*, 2000. 152 p.
- Nelson W. (1990). Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses. New York: *John Wiley and Sons*, 1990. 605 p.
- Ostreikovskiy V. A. (2023). Reliability Theory. Moscow: *Higher School*, 2023. 463 p. (in Russian)
- Pasquini A., Pistolesi G., Rizzo A. (2001). Reliability analysis of systems based on software and human resources. *IEEE Trans. Reliab.* 50(4): 337-345.
- Pronikov A. S. (2002). Parametric reliability of machines. Moscow: *Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University*. 2002. 560 p. (in Russian)
- Rukhin A. L., Khsiekh H. K. (1989). Review of Soviet reliability work. *Reliability and quality control*. 1989. 2: 3-25. (in Russian)
- Ryabinin I. A. (2000). Reliability and safety of structurally complex systems. Moscow: *Polytechnic*, 2000. 248 p. (in Russian)
- Savchuk V. P. (1989). Bayesian methods of statistical assessment: Reliability of technical facilities. Moscow: *Science. Ch. ed. Physical-mat. lit.*, 1989. 322 p. (in Russian)
- Sheng-Tsaing Tseng. (2000). Step-Stress Accelerated Degradation Analysis For Highly Reliable Products. *Journal of Quality Technology*. 32(3): 209-216.
- Shper V. L. (1992). The problem of accelerated testing of electronics products and radio electronics. Modern state. In Sat. «*Quality and reliability of products*». 5(21): 79-120.
- Shper V. L. (1997). On standardization of failure model. *Reliability and quality control*. 10: 40-48. (in Russian)
- Smagin V. A. (1998). Physical and probabilistic models for predicting the reliability of products based on forcing tests. *Reliability and quality control*. 4: 15-23. (in Russian)
- Smagin V. A. (1999). About one model of forced tests. *Reliability and quality control*. 4: 46-48. (in Russian)
- Strelnikov V. P. (1997). On standardization of failure model. *Reliability and quality control*. 3: 26-40. (in Russian)
- Ushakov I. A., Pusher V. (2002a). Calculation of spare parts nomenclature for mobile repair shops. *Quality management methods*. 4: 41-42. (in Russian)
- Ushakov I. A., Pusher V. (2002b). Territorial-distributed maintenance system. *Quality management methods*. 2: 32-36.
- Ushakov I. A., Weise S. (2000). Assessment of reliability of elements based on the results of systems testing. *Quality management methods*. 8: 26-27. (in Russian)
- Utkin L. V. (2003). Imprecise reliability of cold standby systems. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 20(6): 722-739.
- Vesnina V. (1995). Method of planning cyclic forced tests. *Reliability and quality control*. 3: 3-8. (in Russian)
- Yarlykov N. E. (2004). Improving the efficiency of reliability control. Moscow: *Radio and communication*. 2004. 151 p. (in Russian)
- Yonghuan Cao. (2002). System availability with non-exponentially distributed outages. *IEEE Transactions on Reliability*. 51(2): 193-198.
- Zamyslov M. A., Zamyslov E. M. (2002). Evaluation of system reliability with functional reconfiguration. *Quality management methods*. 6: 36-39. (in Russian)