

РЕФЕРАТИВНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий

Владимир Шпер,
к.т.н., академик АПК РФ, Москва, Россия

(продолжение, начало в № 3)

Надежность систем

Этот раздел мне бы хотелось начать с работы И.А. Ушакова, С. Вайзе [105], которая посвящена весьма неожиданной теме: как по надежности системы оценить надежность её компонентов? (Так сказать, обратная задача надежности систем)⁹. Большинство оценок, полученных в работе [105], имеют эвристический характер, а сама задача оказывается вовсе не столь тривиальной, как это может показаться на первый взгляд.

Следующая статья группы авторов, но снова с участием И. Ушакова [106], по сути представляет собой обмен опытом в области системы гарантийного обслуживания. Авторы разработали модель для кратковременного прогноза числа возвратов в последующий период времени на основе известного числа возвратов за прошедший период. Ясно, что решение такой задачи обеспечивает бóльшую оперативность выполнения гарантийных ремонтов. В статье приведена программа, написанная для расчетов в Excel'e, так что читатели могут легко получить работоспособный программный продукт, позволяющий улучшить систему обслуживания потребителей.

В 2002 году И. Ушаков порадовал нас ещё тремя работами в области надежности систем. В работе [107] он совместно с В. Пушером рассмотрел 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 получения ответа. В статье рассмотрен практически пример использования предложенного метода (к сожалению¹⁰, применительно к системе территориального деления в американском штате Флорида).

В работе [108] те же авторы рассмотрели ещё одну задачу систем технического обслуживания. На этот раз речь шла о поиске такого набора запчастей (при наличии ограничения на их суммарный объем - т.е. для небольшого склада, передвижной ремонтной мастерской и т.п.), 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, а именно: надо упорядочить все запчасти по убыванию значений их ИО, а затем выбрать K первых из них

⁹ Кстати, замечу мимоходом, что на этой ссылке очень хорошо видна вся условность рубрикации данного обзора. В самом деле, в какой раздел надо отнести эту статью: систем или элементов? Данная ссылка имеет своей целью настроить читателя не слишком серьезно относиться к делению материала на подразделы.

¹⁰ Моё "к сожалению" относится к тому прискорбному факту, что такой выдающийся специалист мирового класса как И. Ушаков оказался не востребованным в РФ.

так, чтобы их суммарный объем не превышал отведенное для запчастей физическое пространство.

Наконец, в работе [109] И. Ушаков и С. Чакраварти рассматривают проблему оценки эффективности сложных систем. Эта проблема обсуждается в литературе более 40 лет, и на этот раз авторы рассмотрели её применительно к спутниковой телекоммуникационной системе Globalstar. В качестве показателя эффективности рассматривалась пропускная способность системы, при решении учитывалась её высокая надежность.

Оптимизацией числа запасных элементов оборудования заняты и авторы работы [110], но на этот раз речь идет об элементах, важных для безопасности АЭС. В результате применения метода анализа на основе нестационарных марковских цепей, и решив соответствующую систему дифференциальных уравнений, авторы получили замечательно простой вывод: при эксплуатации системы в течение года оптимальное число запасных элементов равно единице, а при эксплуатации от 2 до 10 лет - оно равно двум [110].

В.А. Богатырев в работе [111] 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, на мой взгляд, является её сугубо теоретический характер.

Тот же автор в работе [112] решает проблему оценки коэффициента сохранения эффективности применительно к системам вычислительной техники, в которых по мере накопления отказов может уменьшаться число принимающих запрос вычислительных машин. В отличие от предыдущей, на этот раз автор приводит достаточное число примеров расчетов по предлагаемой им методике решения данной задачи.

В. Челябин в работе [113] попытался решить чрезвычайно актуальную задачу оценки надежности территориальной системы электроснабжения. Применяя теорию графов, автор пытается вычислить вероятности перехода системы из работоспособного состояния в неработоспособное для определенных топологических структур, и с учетом некоторого набора состояний каждого из элементов. Мне представляется, что среди допущений, положенных в основу модели, есть такие, какие заведомо не выполняются при развитии крупных энергетических аварий, т.е. модель работы [113], на мой взгляд, не применима к ситуациям типа недавнего энергетического кризиса в Москве.

С. Ермаков в работе [114] обсуждает проблемы надежности электропитания центров обработки данных в условиях, когда требуется очень высокая надежность электропитания. В статье приведены практические рекомендации и конкретные схемы, позволяющие достигнуть высоких значений коэффициента готовности системы.

В работе [115] анализируется проблема оценки надежности системы с функциональной избыточностью определенного типа, которую авторы называют функциональной реконфигурацией. Речь идет о системе, которая состоит из n одинаковых модулей, каждый из которых выполняет n одинаковых по трудности функций плюс одна индивидуальная функция. Работа изобилует формулами из области вероятностной логики, но результат всех этих упражнений довольно прост: такая система по надежности уступает системе с двукратным резервированием замещением, но превосходит систему без резервирования.

Зарубежные работы по надежности систем публикуются практически в каждом номере журнала IEEE Transactions on Reliability, на всех конференциях и т.д. Вот несколько примеров.

Группа авторов в работе [116] обсуждает проблему надежности коммуникационных систем связи. Ими разработана методика расчета так называемых блокирующих вероятностей. Речь идет о том, что коммуникационные сети обычно высоконадежны, но время от времени вероятность того, что сигнал не дойдет до места назначения вдруг подскакивает от почти нуля

до неприемлемо высоких значений. Прогнозированию таких отказов и посвящена работа [116]. В ней приведены примеры расчетов и результаты моделирования. Кроме того, там же в [116] опубликованы критические замечания других специалистов, и ответы авторов.

В работе [117] предпринята попытка проанализировать надежность систем с помощью модели роста надежности (об этой МН см. ниже) применительно к надежности оператора и взаимодействию человека с машиной. В работе сделан ряд выводов относительно практики подготовки операторов и системы проектирования интерфейсов.

S. Mathew в работе [118] разрабатывает систему оптимального обслуживания стареющей системы с растущей ИО. В рассмотрение включены вопросы затрат, включая стоимость человеко-часов, и прочие затраты на обслуживание. Автор анализирует проблему с точки зрения выработки оптимальной частоты обслуживания оборудования.

В том же журнале в работе [119] предлагается метод прогнозирования эксплуатационных отказов восстанавливаемых систем. Для этого авторам пришлось создать новую модель путем объединения теории нейронных сетей с сезонной авторегрессионной моделью скользящего среднего.

Группа авторов в работе [120] рассматривает проблему оценки стационарной готовности систем, имеющих различные типы простоев с произвольными ФР. Рассматриваются случаи внеплановых простоев, и простоев, когда вся информация – это двухсторонний интервал времени запланированного ожидания. Все оценки сравниваются с результатами, полученными при допущении об экспоненциальном распределении времен ожиданий и восстановлений.

Л.Уткин в работе [121] анализирует надежность систем холодного резерва при условии, что вместо обычного допущения об известных ФР отказов элементов, мы располагаем только информацией о нижних и верхних границах некоторых событий. Анализируется влияние типа доступной информации на получаемые оценки, и приводится несколько примеров расчетов по предложенной модели.

Испытания на надежность (контрольные, определительные, ускоренные)

Обычными испытаниями на надежность – контрольными и определительными - практически никто уже не занимается, поскольку основные проблемы решены и описаны давно. Тем не менее, прежде, чем перейти к ускоренным испытаниям, которыми весь мир занимался и продолжает заниматься, отметим несколько работ, заслуживающих, на мой взгляд, внимания. С. Гродзенский в работе [122] дал краткий обзор последовательных планов испытаний на надежность и провел сравнительный анализ планов, основанных на критериях Вальда, Айвазяна, Лордена, Павлова и планов с параболическими границами. Сухой остаток работы [122] 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.

Тот же автор в работе [123] провел сравнение последовательных планов испытаний при том же наборе критериев, но в условиях, когда моменты отказов распределены в соответствии с экспоненциальным или вейбулловским распределениями (см. выше его же работы по этим ФР). Выводы этой работы полностью согласуются с предыдущей. В частности, если α и $\beta \geq 0,05$, то оптимальны планы с параболическими границами браковки.

В.А Лапидус предложил новый подход к статистическому контролю качества, включая и контроль надежности. Этот подход был назван автором "принципом распределения приоритетов" – [124]. 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. Лично мне представляется, что этот подход малоперспективен именно из-за наличия третьей стороны, к которой по замыслу авторов [124] должны обратиться изготовитель и потребитель.

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 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 мы хотим оценить величину $R(t_0)$ за время $t^* < t_0$, то это и будет означать, что мы хотим провести УИ на надежность. Термин "ускоренные" в данном случае означает "требуемые 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, превышающих их нормальные рабочие нагрузки/воздействия. Далее под УИ я в основном понимаю 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 автоточности УИ), тогда никакие предсказания не возможны, и, более того, бессмысленны. С другой стороны, на современном уровне развития науки и техники мы очень редко когда знаем точные ПМО реальных изделий и систем. Поэтому, начиная с самых ранних работ по УИ, как правило, молчаливо, используется следующее допущение: сохранение одних и тех же ПМО эквивалентно сохранению 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 $F_*(t/w_*)$:

$$F_0(t/w_0) = F_*(g(t)/w_*), \quad (5)$$

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

Так же, как было описано в разделе об обработке данных, все те МН, какие были показаны на рис.2, используются и при планировании и обработке данных УИ. Основополагающие русскоязычные работы в области УИ – это книги [22, 23(т.№7),125-127], а также обзоры [128-131] (см. также тематический выпуск журнала ТИИЭР, 1974, т.62, №2). Более недавние обзоры по проблемам УИ содержатся в публикациях [132-134], причем все они посвящены проблеме УИ применительно к изделиям электроники, а также радио- и электротехники. Основополагающие англоязычные источники – это, прежде всего, книга [41], а из более поздних – [135]. На книге [135] я бы хотел остановиться чуть подробнее. Это – лучшее, что сегодня можно порекомендовать по проблеме УИ. Автор книги – специалист с более чем 20-летним стажем работы в области надежности в General Electric. Книга написана с акцентом на практическое использование, и изобилует реальными данными и примерами использования тех или иных методик расчета, взятыми из самых различных областей электроники, электротехники и машиностроения. Наиболее интересные зарубежные обзоры по данной теме последних лет – это работы [136-138]. При этом в [136] анализируются кинетические МН по классификации рис.2, в [137] обсуждаются проблемы правильной организации УИ, а работа [138] – это обзор по УИ, подготовленный профессиональными статистиками. Надо отметить, что авторы обзора [138] последние годы много и плодотворно работают в области УИ, и им принадлежит одна из последних по времени книг, где этот вопрос подробно анализируется [139].

Наиболее распространены функциональные модели УИ, т.е. такие 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, т.к. при параллельности ФР для любой квантили p отношение времени, за которое происходит p отказов в нормальном режиме - $t_0(p)$ к аналогичному значению для ускоренного режима - $t^*(p)$ будет одно и то же. Его как раз и называют коэффициентом ускорения. Что касается зависимости КУ от параметров режимов, то наибольшей популярностью во всем мире пользуются следующие модели: Аррениуса, Эйринга и обратной степени. Как уже выше подчеркивалось, полнее всего материалы о КУ для разных МН и для очень широкого спектра самых разных объектов содержатся в книге Нельсона [135]. Из русскоязычных публикаций последних лет стоит отметить следующие. Статистические проблемы прогнозирования надежности по результатам УИ анализируются в статье М. Каминского [140]. В. Веснин в [141] рассматривает проблему расчета числа циклов УИ применительно к циклическому режиму работы объекта (используется модель накопления повреждений в самом простом её варианте). Р. Рыньков в серии работ предлагает информационно-энтропийную модель расходования ресурса [142] (ссылки на предшествующие работы того же автора см. в [142]). Критический обзор термодинамических МН содержится в обзоре [132], и хотя работа [142] появилась заметно позже, отношение автора данного обзора к ней осталось неизменным: на мой взгляд, эти МН не могут быть не доказаны, не опровергнуты, и, во всяком случае, их универсальная применимость, о которой говорит автор [142], весьма сомнительна.

В [143] описаны 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.

Ещё одна чисто практическая работа по УИ отечественных механических часов на долговечность описана в [144]. Ускорение осуществлялось за счет непрерывной заводки часов, причем авторам удалось получить КУ, равный 319. Это позволило им получить данные о ПН вместо 10 лет за 3 недели.

Г. Карташов продолжает свои исследования в области моделей расходования ресурса в статье [145]. На этот раз он исследует теоретический вид возможных траекторий параметров в процессе испытаний. Лично мне кажется, что большинство работ этого автора по УИ построены так, что допущения, положенные в их основу, не могут быть ни доказаны, ни опровергнуты, и это существенно снижает их практическую ценность.

В. Смагин в своих работах [146,147] попытался развить известную МН, называемую в отечественной литературе "Физическим принципом Седякина" [148]. 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. (см. комментарий проф. Сингпурвалла в [10]), и который по сути сводится к формуле (5).

Из зарубежных работ по УИ самого последнего времени отмечу, прежде всего, книгу [149]. 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 надёжности. 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;

NASA – 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 надёжности, 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 надёжности, обнаруженных при HALT и HASS. На самом деле эти испытания, конечно же, имеют своих многочисленных предшественников в предыдущие годы, с библиографией которых лучше всего ознакомиться по книге [148].

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 [150]. Также деградационным УИ посвящены работы [151,152], причем в [151] обсуждается проблема ускоренных коррозионных испытаний аэрокосмических материалов, а в [152] обсуждаются испытания с ужесточенными критическими значениями параметров.

В [153] 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 [154]. Впрочем, как показано в [155], это просто специальный случай обычной модели ступенчатых испытаний. Авторы [156] применили модель пропорциональных интенсивностей (см. об этой модели в [127]) 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 [157].

В заключение этого подраздела немного просто полезной информации по УИ. Журнал "International Journal of Quality and Reliability Management" в 1998 году посвятил УИ специальный выпуск. С его оглавлением и аннотациями статей можно ознакомиться на странице: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jissue/30002049>. Наконец, один из наиболее известных специалистов в области УИ – W. Nelson – опубликовал в журнале "IEEE Transactions on Reliability" библиографию по планам УИ [158]. В ней 159 ссылок, посвященных статистическим планам проведения УИ и методам обработки их результатов.

Некоторые старые и новые направления, персоналии, журналы и сайты, подготовка специалистов.

В этом разделе дан обзор ряда работ, которые по разным причинам не попали в предыдущие разделы. Иногда это происходило по той причине, что их можно было отнести к разным подразделам, иногда случайно, иногда по техническим причинам и т.п. Кроме того, здесь я попытался ответить на некоторые вопросы, которые волновали автора все время написания данной работы, например, кто из известных специалистов ещё работает в РФ, в каких журналах надо искать информацию о надежности и т.п.

Сначала несколько статей о прогнозировании надежности по результатам испытаний. В [159,160] обсуждаются непараметрические подходы к оценке результатов цензурированных различным образом испытаний. В [161] описана процедура прогнозирования границ для будущих отказов по результатам цензурированных испытаний, причем рассмотрены случаи как прогнозирования отказов для той же самой выборки, так и для новой выборки. Несколько статей посвящено применению так называемой модели роста надежности, которую в англоязычной литературе часто называют моделью Дуана (Duane). Речь идет о том, что по мере эксплуатации систем, в которых действуют программы обеспечения и повышения надежности, их среднее время между отказами (MTBF) по отношению к полному времени работы системы растет, причем по очень простому степенному закону. Работы в указанных ссылках преимущественно расширяют область применимости или уточняют модель Дуана для конкретных обстоятельств [162-164].

Как уже упоминалось, этап падающей ИО на рис.3 носит название этапа приработки. Работ именно по этому этапу жизни объектов довольно много, но я бы отметил следующие. Довольно старый, но важный обзор был опубликован в ТИИЭР в 1983 году [165]. В нем обсуждается проблема оптимизации длительности тренировки для изделий электронной техники. В обзоре 92 ссылки на работы в этом направлении.

Общие проблемы приработки и соответствующие обобщенные модели обсуждаются в работах [166,167].

В [168] в очередной и далеко не первый раз критикуется знаменитая ваннообразная функция ИО (рис.3). Авторы призывают к осторожному е1 использованию, особенно применительно к проблемам приработки и отбраковки под нагрузкой.

В последнее время появляется довольно много работ, в которых авторы так или иначе пытаются связать информацию о ПН, получаемую из различных источников (контрольных испытаний, эксплуатации, УИ и т.д.) с информацией о конструкции, с экспертными оценками качества разработки, с данными, накопившимися по мере доводки и совершенствования системы. В качестве примеров можно ознакомиться с работами [169-172].

В [173] предпринята попытка оценки надежности системы в условиях недостатка информации о её состояниях. Для этого предлагается использовать теорию нечетких множеств

Заде. Данную работу можно рассматривать как один из шагов по применению нетрадиционных подходов к задачам надёжности.

Ещё одно совсем "свежее" направление в методах оценки и прогнозирования надёжности – применение теории мультифракталов и вейвлет-анализа для решения соответствующих задач. Р. Зайнетдинов опубликовал две работы в этом направлении, которые, можно надеяться, послужат толчком для дальнейшего развития [174,175].

Г. Садыхов продолжает свои давно ведущиеся работы по исследованию остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. Довольно большой обзор современного состояния этих работ в части их статистического анализа и обоснования, написанный совместно с Г. Карташовым, представлен в [176]. В статье [177] в общем виде, но с практической точки зрения, обсуждаются проблемы остаточного ресурса энергоблоков АЭС.

Авторы работы [178] попытались с целью прогнозирования ПН построить нестационарную непараметрическую МН. Другой, отмечавшийся выше, пробел в используемых традиционно методах анализа надёжности попытался устранить известный российский специалист И. Аронов. В статье [179] он обсуждает методики оценки вероятности безотказной работы для систем с зависимыми отказами составляющих её элементов. Приведены практические примеры расчетов из разных областей техники. Он же в заметке [180] дал краткий обзор некоторых последних книг по надёжности, изданных за рубежом.

Практические советы, как использовать хорошо знакомую многим диаграмму Парето для повышения надёжности, дает известный специалист в области надёжности В. Нетес [181].

Надо отметить, что в стороне от моего рассмотрения остался такой широко распространенный сегодня во всем мире метод повышения надёжности как "Анализ видов и механизмов отказов" (FMEA). Дело в том, что это метод экспертной оценки, разработанный специально для получения количественных оценок в случаях, когда вероятностные методы расчетов оказываются слишком сложными и/или трудоемкими. По этому вопросу совсем недавно в журнале ММК прошла небольшая дискуссия между двумя ведущими в своих областях специалистами: Дзиркалом Э.В. и Ароновым И.З. (см. ММК, 2004, №11, с.36-40). Метод FMEA, на мой взгляд, может быть предметом самостоятельного обзора, т.к. по нему в настоящее время и у нас в стране, и за рубежом, имеется очень много публикаций. Это объясняется очень простым фактором: этот метод является обязательным для всех организаций, пытающихся получить сертификат соответствия международным ТУ 16949:2002.

Следующие две работы, на которые я хотел бы обратить внимание, посвящены надёжности обслуживания [182,183]. Здесь я должен открыть читателям страшную тайну: в заглавии данного обзора первоначально стояли слова о надёжности продукции и услуг. Однако, поразмыслив, я вычеркнул слова о надёжности услуг, поскольку не понятно, что это такое? Даже определения, что такое надёжность услуги, мне не удалось найти. Тем не менее, статьи [182,183] показывают, что на самом деле я был не прав: по всей видимости, жизнь требует того, чтобы понятие о надёжности услуг было введено со всеми вытекающими отсюда последствиями. Основная трудность, какую видит автор данного обзора, состоит в том, что качество услуги - это оценка восприятия потребителем всего того, что поставщик для него делает, плюс, к тому же, растянутая во времени оценка. По-видимому, к этому вопросу нам предстоит ещё вернуться. Ясно, что надёжность как научное и практическое направление в 21 веке ждут большие перемены, и все вышесказанное – одна из них. Группа авторов работы [184] обсуждает этот вопрос с общих позиций системного подхода.

В обзоре А. Раскина описана система сертификации инженеров по надёжности в США [185]. Ничего подобного, к сожалению, у нас нет. Более того, можно уверенно констатировать, что общий уровень как подготовки специалистов в ВУЗах, так и уровень выполняемых на предприятиях работ снизился. Ряд специалистов высшего класса, таких, как И.А. Ушаков, Ю.К.

Беляев, И.Б. Герцбах и др. работали последние годы за границей. Другие известные специалисты, упоминавшиеся в обзоре, например, И.З. Аронов, Э.В. Дзиркал и др. – поменяли основную сферу деятельности, и занимаются проблемами надёжности от случая к случаю. Как ясно из обзора, почти не выходили последнее время новые книги по надёжности, и практически не появилось нового поколения авторов. Столь же грустная ситуация и на предприятиях. К тому, что выше отмечалось при обсуждении проблем надёжности изделий радиоэлектроники, стоит добавить, что в процессе сокращения персонала группы надёжности были ликвидированы на многих предприятиях одними из первых (обычно вместе с сокращением штата ОТК, метрологов и т.п.). Все это говорит о непонимании, прежде всего, высшим руководством отечественных компаний и организаций той роли, которую играла, играет и будет играть надёжность в современном мире. Ещё раз стоит подчеркнуть, что в 21 веке надёжность будет играть в известном смысле определяющую роль в обеспечении конкурентоспособности, в первую очередь в связи с необходимостью как можно быстрее получать информацию об отказах новых разработок, вносить в них изменения и снова как можно быстрее получать информацию о результатах внесенных изменений. Это означает, что, в частности, УИ на надёжность должны стать одним из важнейших инструментов совершенствования процессов в любых организациях. Возвращаясь к проблеме роли высшего руководства, стоит отметить книгу [186], которая была переведена на русский язык в 1990 году, но, к сожалению, по-видимому, не стала настольной книгой большинства руководителей.

В заключение данного обзора хочу обратить внимание на серию публикаций в журнале "Quality Progress" [187-192]. Это тщательно продуманная серия публикаций, подготовленных ведущими американскими специалистами по надёжности, и призванная служить введением в проблему. Другими словами, это серия статей, с помощью которых молодые специалисты в самых различных областях науки и техники могут очень быстро познакомиться с вопросом и "войти" в проблему.

Ничего подобного в нашей литературе пока что не появлялось.

Как следует из обзора, в основном положение, о котором писали Рухин, Хсиех и проблемы, о каких писал Ушаков остаются в ожидании следующего поколения специалистов по надёжности, если, конечно, оно появится.

Последняя информация, какую я хотел бы привести в данной работе, это адреса сайтов и журналов в области надёжности, которые заслуживают, на мой взгляд, систематического просмотра.

Журналы:

Заводская лаборатория - <http://phase.imet.ac.ru/zavlabor/>

Вестник машиностроения - <http://www.mashin.ru/jurnal/adr.php?id=5>

Методы Менеджмента Качества –

www.stq.ru/riaside/index.phtml?page=1&tbl=works&id=9

IEEE Transactions on Reliability –

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isYear=2005&isnumber=30936&Submit32=Go+To+Issue>

Microelectronics and Reliability –

http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/274/description#description

International Journal of Quality and Reliability Management –

<http://oberon.emeraldinsight.com/vl=3961565/cl=90/nw=1/rpsv/ijqrm.htm>

Journal of Quality Technology – <http://www.asq.org/pub/jqt/>

Quality Progress – <http://www.asq.org/pub/qualityprogress/>

Quality Engineering –

<http://taylorandfrancis.metapress.com/app/home/journal.asp?wasp=d68cd10ac7dd44cdb45ddd202c14b02b&referrer=parent&backto=linkingpublicationresults,1:107860,1>

Technometrics – <http://www.amstat.org/publications/tech/index.cfm?fuseaction=main>

Quality and Reliability Engineering International –

<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jhome/3680>

Сайты:

<http://web.utk.edu/~leon/rel/>

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome.jsp?punumber=1000626>

http://www.ieee.org/portal/site/relsoc/menuitem.112d36a56667b078fb2275875bac26c8/index.jsp?&pName=relsoc_home

<http://www.asq.org/perl/index.pl?g=reliability>

Заключение

Все, что я могу сказать в заключение, сводится к грустному выводу: дела с надёжностью в РФ обстоят довольно плохо. Значительная часть специалистов разъехалась, или перестала работать в данной области. Число журналов и публикаций по проблеме надёжности, снижается, и уровень публикаций в целом, падает. Подготовкой молодых специалистов ВУЗы практически не занимаются. Общественные институты, типа регулярных семинаров и/или конференций, почти исчезли. Между тем роль надёжности в мире, по крайней мере, в развитых странах, растёт, хотя направленность исследований постепенно меняется в сторону использования методов оценки ПН для быстрого получения информации о качестве разработок. Даже простой просмотр списка литературы показывает резкое увеличение числа авторов из Юго-Восточной Азии. Т.е. все быстро развивающиеся и стремящиеся не отстать от переднего края мирового прогресса страны активно занимаются проблемами надёжности, чего, к сожалению, не наблюдается на просторах бывшего СССР.

Литература

1. Ушаков И.А., Вайзе С. Оценка надёжности элементов по результатам испытаний систем. - ММК, 2000, №8, с.26-27.
2. Гианулис Л. и др. Прогноз ожидаемого числа возвратов отказавшей продукции при массовом производстве. На примере портативных телефонов. - ММК, 2000, №11, с.38-41.
3. Ушаков И.А., Пушер В. Территориально-распределенная система технического обслуживания. - ММК, 2002, №2, с.32-36.
4. Ушаков И.А., Пушер В. Расчет номенклатуры запчастей для передвижных ремонтных мастерских. - ММК, 2002, №4, с.41-42.
5. Ушаков И.А., Чакраварти С. Влияние надёжности на пропускную способность систем связи. - ММК, 2002, №7, с.39-42.
6. Антонов А.В. и др. Оптимизация числа запасных элементов оборудования, важных для безопасности АЭС. - ММК, 2001, №8, с.27-30.
7. Богатырев В.А. Отказоустойчивость функционально-распределенных систем. - ММК, 2001, №3, с.34-37.
8. Богатырев В.А. Оценка коэффициента сохранения эффективности отказоустойчивых систем из многофункциональных модулей. - ММК, 2001, №9, с.29-33.

9. **Челядин В.Л.** Оценка надёжности территориальной системы электроснабжения. - ММК, 2003, №1, с. 44-47.
10. **Ермаков С.** Автоматы выбора линии. - www.osp.ru/lan/2004/11/080.htm
11. **Замыслов М.А., Замыслов Е.М.** Оценка надёжности системы с функциональной реконфигурацией. – ММК, 2002, №6, с.36-39.
12. **Becker R.A., Clark L. and Lambert D.** Events Defined by Duration and Severity, With an Application to Network Reliability. - Technometrics, 1998, v.40, #3, pp.177-189. Discussion: pp. 190-194.
13. **Pasquini A., Pistolesi G., Rizzo A.** Reliability analysis of systems based on software and human resources. - IEEE Trans. Reliab., 2001, v.50, #4, pp.337-345.
14. **Mathew S.** Optimal inspection frequency: A tool for maintenance planning/forecasting. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2004, v.21, #7, pp.763-771.
15. **Lee-Ing Tong, Yi-Hui Liang.** Forecasting field failures data for repairable systems using neural networks and SARIMA. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2005, v.22, #4, pp.410-420.
16. **Yonghuan Cao et al.** System availability with non-exponentially distributed outages. – IEEE Transactions on Reliability, 2002, v.51, #2, pp.193-198.
17. **Utkin L.V.** Imprecise reliability of cold standby systems. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2003, v.20, #6, pp.722-739.
18. **Гродзенский С.Я.** Рационализация контрольных испытаний на надёжность. – ММК, 2001, №1, с.31-36.
19. **Гродзенский С.Я.** Последовательный контроль надёжности изделий по количественным признакам. – ММК, 2001, №7, с.31-34.
20. **Статистический контроль качества продукции на основе принципа распределения приоритетов/В.А. Лапидус и др.** – М.: Финансы и статистика, 1991. – 224с.
21. **Пешес Л.Я., Степанова М.Д.** Основы ускоренных испытаний на надёжность. – Минск, Наука и техника, 1972. – 168с.
22. **Перротте А.И., Карташов Г.Д., Цветаев К.Н.** Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надёжность. – М.: Сов. Радио, 1968. – 224с.
23. **Кокс Д.Р., Оутс Д.** Анализ данных типа времени жизни: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 191С.
24. **Тимонин В.И.** Математические методы в теории ускоренных испытаний/Зарубежная радиоэлектроника, 1981, №1, С.51-57.
25. **Карташов Г.Д.** Модели расходования ресурса изделий электронной техники/Обзоры по ЭТ, Сер.8. - 1977, вып.1, С.1-76.
26. **Каминский М.П.** Статистические методы планирования и обработки результатов форсированных испытаний радиодеталей/Обзоры по ЭТ, Сер.5. - 1987, вып.1(1252), С.1-47.
27. **Сурин В.М., Осипов М.В.** Методы ускоренных испытаний ИЭТ на вибрационные и ударные воздействия. – Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ "Электроника", 1991. – 76с.
28. **Шпер В.Л.** Проблема ускоренных испытаний изделий электроники и радиоэлектроники. Современное состояние/В сб. "Качество и надёжность изделий", №5(21). - М.: "Знание", 1992, С.79-120.
29. **Буроменский Н.Г.** Форсированные испытания радиоэлектронной аппаратуры, основанные на оасчетно-экспериментальном определении коэффициента ускорения/В сб. "Качество и надёжность изделий", №1(22). - М.: "Знание", 1993, с.3-35.

30. **Явриян А.Н. и др.** Основные принципы и методы ускоренных испытаний на надёжность радиоэлектронной аппаратуры/В сб. "Качество и надёжность изделий", №2(23). - М.: "Знание", 1993, с.3-111.
31. **Nelson W.** Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses. – N.Y., John Wiley and Sons, 1990. -605P.
32. **LuValle M.J. et al.** Acceleration Transforms and Statistical Kinetic Models. – J. Statistical Physics, 1988, v.52, #1/2, pp.311-330.
33. **LuValle M.J.** A Note on Experiment Design for Accelerated Life Tests. - Microelectronics and Reliability, 1990, v.30, #3, pp.591-603.
34. **Meeker W.Q. and Escobar L.A.** A Review of Recent Research and Current Issues in Accelerated Testing. – International Statistical Review, 1993, v.61, #1, pp.147-168.
35. **Meeker W.Q. and Escobar L.A.** Statistical Methods for Reliability Data. – N.Y., John Wiley and Sons, 1998.
36. **Каминский М.П.** Непараметрическое прогнозирование квантилей времени безотказной работы по результатам испытаний в форсированных режимах. – НКК, 1990, №7, с.3-7.
37. **Веснин В.** Метод планирования циклических форсированных испытаний. – НКК, 1995, №3, с.3-8.
38. **Рыньков Р.Н.** Построение информационно-энтропийного ресурсного пространства для определения ресурса изделий по критериям разрушений. – НКК, 1996, №3, с.37-43.
39. **Доминич А.П., Писарев В.Н.** Ускоренные испытания на безотказность вычислительной техники. – НКК, 1996, №12, с.19-27.
40. **Кузнецов К.А. и др.** Ускоренные испытания наручных механических часов на долговечность. – ММК, 2000, №8, с.31.
41. **Карташов Г.Д.** Марковские модели прогнозирования надёжности. – НКК, 1998, №12, с.33-36.
42. **Смагин В.А.** Физико-вероятностные модели прогнозирования надёжности изделий на основе форсирования испытаний. – НКК, 1998, №4, с.15-23.
43. **Смагин В.А.** Об одной модели форсированных испытаний. – НКК, 1999, №4, с.46-48.
44. **Седякин В.М.** Об одном физическом принципе теории надёжности. – Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1966, №3, с.80-87.
45. **McLean H.W.** HALT, HASS & HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques. – Milwaukee, ASQ Quality Press, 2000. – 152P.
46. **Sheng-Tsaing Tseng et al.** Step-Stress Accelerated Degradation Analysis For Highly Reliable Products. – Journal of Quality Technology, 2000, v.32, #3, pp.209-216.
47. **Baldwin K.R. and Smith C.J.E.** Accelerated corrosion tests for aerospace materials: current limitations and future trends. – Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 1999, v.71, #3, pp.239-244.
48. **Guangbin Yang, Kai Yang.** Accelerated degradation-tests with tightened critical values. – IEEE Trans. Reliab., 2002, v.51, #4, pp.463-468.
49. **Khamis I.H.** Comparison between constant and step-stress tests for Weibull models. - International Journal of Quality and Reliability Management, 1996, v.14, #1, pp.74-81.
50. **Khamis I.H. and Higgins J.J.** An alternative to the Weibull step-stress model. - International Journal of Quality and Reliability Management, 1999, v.16, #2, pp.158-165.
51. **Haiyan Xu, Yincai Tang.** Commentary: the Khamis/Higgins model. – IEEE Trans. Reliab., 2003, v.52, #1, pp.4-6.
52. **Bagdonavicius V.B. et al.** Parametric inference for step-stress models. – IEEE Trans. Reliab., 2002, v.51, #1, pp.27-31.

53. **Edgeman R.L. and Lin D.K.J.** Sequential analysis of accelerated life model. - International Journal of Quality and Reliability Management, 1997, v.14, #6, pp.598-605.
54. **Nelson W.B.** A bibliography of accelerated test plans. – IEEE Trans. Reliab., 2005, v.54, #2, pp.194-197.
55. **Lee-Ing Tong and Cha0-Ton Su.** A non-parametric method for experimental analysis with censored data. - International Journal of Quality and Reliability Management, 1997, v.14, #5, pp.456-463.
56. **Davis Ch.B., McNichols R.J.** Simultaneous Nonparametric Prediction Limits. - Technometrics, 1999, v.41, #2, pp.89-101.
57. **Escobar L.A., Meeker W.Q.** Statistical Prediction Based on Censored Life Data. - Technometrics, 1999, v.41, #2, pp.113-124.
58. **Sen A.** Estimation of Current Reliability in a Duane-Based Reliability Growth Model. – A Journal of Statistics for the Physical, Chemical, and Engineering Science. – 1998, v.40, #1, pp.334-344.
59. **Donovan J., Murphy E.** Simulation and comparison of reliability growth models. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2002, v.19, #3, pp.259-271.
60. **Quigley J., Walls L.** Confidence intervals for reliability-growth models with small sample-sizes. – IEEE Trans. Reliab., 2003, v.52, #2, pp.257-262.
61. **Го Вай, Го Юэ.** Проблемы ранних отказов: Обзор современного состояния вопроса тренировки. – ТИИЭР, 1983, т.71, №11, с.33-44.
62. **Kim K.O., Kuo W.** Some considerations on system burn-in. – IEEE Trans. Reliab., 2005, v.54,#2, pp.207-214.
63. **Ji Hwan Cha.** Some considerations on system burn-in. – IEEE Trans. Reliab., 2005, v.54,#2, pp.198-206.
64. **Klutke G.A. et al.** A critical look at the bathtub curve. – IEEE Trans. Reliab., 2003, v.52, #1, pp.125-129.
65. **Walls L., Quigley J.** Learning to improve reliability during system development. - European Journal of Operational Research, 1999, v.119, #2, pp.495-511.
66. **De Theije S.M. et al.** Reliability tests to control design quality: a case study. - International Journal of Quality and Reliability Management, 1998, v.15, #6, pp.599-618.
67. **Ульянов С.В.** Прогнозирование надежности невосстанавливаемых объектов длительного функционирования с учетом производственных дефектов и режимов эксплуатации. – ММК, 2000, №11, с.35-37.
68. **Ковалев Ф.И и др.** Методологические предпосылки к упреждению отказов машин и машинных агрегатов роторного типа. – ММК, 2001, №3, с.38-40.
69. **Золотухин В.Ф., Павлов А.А.** Характеристики надежности в условиях неразличимости. - ММК, 2002, №3, с. 36-38.
70. **Зайнетдинов Р.И.** Представление результатов испытаний Бернулли в виде мультифрактала. – ММК, 2000, №3, с.36-41.
71. **Зайнетдинов Р.И.** Подтверждение мультифрактальной природы последовательности отказов с использованием вейвлет-анализа. – ММК, 2000, №9, с.21-26.
72. **Карташов Г.Д., Садыхов Г.С.** Основные методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. – Успехи современной радиоэлектроники, 2000, №9, с.3-20.
73. **Калиберда И.В.** О сроках безопасной эксплуатации действующих атомных энергоблоков. Безопасность, надежность, риск. – ММК, 2000, 39, с.26-30.
74. **Pfefferman J.D., Cernuschi-Fries B.** A nonparametric non-stationary procedure for failure prediction. – IEEE Trans. Reliab., 2002, v.51, #4, pp.434-442.
75. **Аронов И.З.** Анализ зависимых отказов – важный способ обеспечения безопасности сложных систем. – ММК, 2004, №10, с.49-53.

76. **Новые** книги зарубежных издательств. – ММК, 2003, №3, с.38-40.
77. **Нетес В.А.** Применение анализа Парето для повышения надёжности. – ММК, 2002, №11, с.35-39.
78. **Mustafa Günes, Ipek Deveci.** Reliability of service systems and an application in student office. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2002, v.19, #2, pp.206-211.
79. **Gamini Gunawardane.** Measuring reliability of service systems using failure rates: variations and extensions. - International Journal of Quality and Reliability Management, 2004, v.21, #5, pp.578-590.
80. **Bennett T.R. et al.** Testing the untestable: reliability in the 21st century. – IEEE Trans. Reliab., 2003, v.52, #1, pp.118-124.
81. **Раскин А.Л.** Сертификация инженеров по надёжности в США. – НКК, 1993, №7, с.51-60.
82. **Никсон Ф.** Роль руководства предприятия в обеспечении качества и надёжности. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 231с.
83. **Hahn G.J. et al.** Reliability Improvement. Issues and Tools. – Quality Progress, 1999, #5, pp.133-139.
84. **Doganaksoy N. et al.** Product Life Data Analysis: A Case Study. - Quality Progress, 2000, #6, pp.115-122.
85. **Meeker W.Q. et al.** Using Degradation Data For Product Reliability Analysis. - Quality Progress, 2001, #6, pp.60-65.
86. **Doganaksoy N. et al.** Reliability Analysis By Failure Mode. - Quality Progress, 2002, #6, pp.47-52.
87. **Hahn G.J. et al.** Speedier Reliability Analysis. – Quality Progress, 2003, #6, pp.58-64.
88. **Meeker W.Q. et al.** Planning Life Tests For Reliability Demonsration. - Quality Progress, 2004, #8, pp.80-82.