



Похабов Ю.П.

О ФИЛОСОФИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ НАДЕЖНОСТИ НА ПРИМЕРАХ УНИКАЛЬНЫХ ВЫСОКООТВЕТСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается философический аспект надежности на примерах уникальных высокоответственных систем, для которых невозможно применять вероятностно-статистические методы теории надежности.

Ключевые слова: уникальные высокоответственные системы, надежность, безотказность, свойство, способность, параметр, показатель.

Введение

Для инженеров не существует, пожалуй, ничего более неопределенного, чем число девяток в показателях безотказности. Без реальной возможности как-то ощутить и измерить эти девятки, возникает соблазн махнуть рукой, да и вписать нужную цифру надежности в техническое задание на разработку, а дальше жизнь рассудит, угадал или нет. На то она и вероятность!

Совершенно недопустимой, с позиций классической теории надежности, выглядит вероятность безотказной работы (ВБР) равная единице, поэтому, дабы не дразнить приверженцев ортодоксальных взглядов, требования по безотказности задают близкими к единице. Однако сути это не меняет. Существует класс технических систем – уникальные высокоответственные системы (УВС), для которых требования ВБР устанавливаются на уровне четырех и выше девяток, при этом в каждом конкретном случае применения подразумевается и ожидается гарантированное выполнение ими функциональных задач [1]. К таким системам в частности относятся крупногабаритные трансформируемые механические системы (КТМС) космических аппаратов (КА) [2], например, раскрывающиеся панели солнечных батарей (БС). Любой отказ в таких системах – это не просто невыполнение требований по надежности, но и огромные, а в некоторых случаях колоссальные, убытки и потери, ставящие под сомнение целесообразность их создания без гарантий надежности.

Между тем верификация безотказности на уровне трех-четырёх девяток для изделий, которые изготавливаются всего лишь в одном экземпляре, является во многом нерешенной научной задачей [3]. Да, и вряд ли найдется инженер, способный решить, что такого нужно практически изменить в конструкции конкретной УВС, чтобы повысить ее безотказность, положим, с трех девяток до четырех девяток. Причем упор непременно будет сделан на отсутствие статистики, т.е., по сути, исходных данных (ведь, речь-то идет о системах, изготовленных в единственном экземпляре). Однако если аналогичный вопрос поставить относительно повышения прочности УВС, тут же будут перечислены конкретные, причем методологические, варианты решения задачи (уникальность объекта здесь не

помеха, и никого это не смущает). Безусловно, показатели надежности технических систем можно, а в некоторых случаях непременно нужно, определять статистическими методами. Но что делать, если статистики под рукой нет, или ее невозможно получить, или поведение объектов не постулируется в форме статистических гипотез?

Впервые учет реальных факторов внешней среды, свойств системы, технологических, эксплуатационных и т.п. требований для решения задач надежности механических систем вместо понятий и методов формальной теории надежности предпринял В.В. Болотин [4-6]. В сформулированной им теории надежности механических систем, надежность рассматривается как эволюция траекторий элементов качества во времени в пределах области допустимых состояний пространства качества, а отказ трактуется как выброс траектории какого-либо элемента за пределы области допустимых состояний. Надежность – это объективная мера возможности наступления событий, которая зависит не от многократности воспроизведения тех или иных событий, а от выбора конкретных материалов, принятых конструкторских решений, используемых технологий и способов производства, условий взаимодействия с внешней средой.

В таком восприятии надежности, девятки в показателе безотказности УВС несут не статистическое, а объективное значение, исходя из чего инженеру требуется научиться методам анализа и оценки надежности, которые бы оживляли цифры в показателях безотказности, визуализируя «траектории элементов качества во времени». Оживить девятки – значит наполнить их смыслами, а потому без философии, как универсального «скальпеля» для препарирования смыслов, здесь никак не обойтись.

Следует отметить, что в данной статье предпринимается далеко не первая попытка проникнуть вглубь философии надежности [7, 8], однако на сей раз предлагается к рассмотрению философский аспект надежности на примерах УВС, для которых в большинстве своем невозможно применять вероятностно-статистические методы теории надежности.

Подход к философскому пониманию надежности

Поскольку всякая наука, каков бы ни был ее предмет, изучает вещи, их свойства и отношения, предлагается обратиться к парадигме об их триединстве, предложенной А.И. Уёмовым [9]. Согласно этой парадигме свойства являются одной из философских категорий, тесно связанных друг с другом и переходящих друг в друга – вещи, как отношение свойств, свойства, как отношение вещей и отношения, как свойство вещей. Свойства относятся исключительно к вещам, выражают те или иные их стороны и не существуют вне отношений вещи к другим вещам.

Чтобы не возникало соблазна «рыночно-барахольного» восприятия сути вещей, условимся в дальнейших рас-

суждениях относить понятие «вещь» к синонимическому ряду, обозначающему предмет: объект, изделие, система и т.д. Т.е. употреблять это понятие в техническом значении.

Любые вещи, как совокупность элементов материального мира – атомов, молекул, веществ, предметов или систем, находятся в непрерывных отношениях взаиморасположения, взаимосвязи и взаимодействия, что проявляется в их свойствах. Вещи обладают внутренней структурой в виде совокупности элементов с определенным пространственным расположением и взаимосвязями: химическими, механическими, геометрическими, кинематическими, жесткостными и пр., что дает возможность вещам не распадаться, иметь заданные геометрические размеры и формы, функционировать определенным образом и пр., т.е. проявляться в виде тех или иных свойств. В то же время свойства вещей проявляются по-иному, изменяясь или дополняясь, если учитывать не только их внутреннюю структуру, но также условия и процессы взаимодействия между элементами: механику, износ, электрохимическую коррозию, ползучесть, смятие, усталость и пр., т.е. режимы сосуществования и функционирования внутренних элементов.

Исходя из единства принципов построения материальных систем, свойства, проявленные во взаиморасположении, взаимосвязи и взаимодействии элементов внутри какой-либо вещи, подобным же образом проявляются во взаиморасположении, взаимосвязи и взаимодействии с другими вещами. В результате отношения вещей друг с другом, свойства каждой из них обнаруживаются как некий суммарный итог, отличный от свойств вещей по отдельности, т.е. проявляются по-иному, чем сами по себе. Таким образом, свойства всегда двойко обусловлены: внутренним содержанием вещи, как совокупности взаиморасположения, взаимосвязей и взаимодействий составляющих ее элементов, и отношениями с окружающими вещами. Любая вещь выступает как совокупность свойств, каждое из которых выражает ее как единое целое с определенной стороны. Например, согласно своим смысловым понятиям, как неизменность, постоянство, достоверность, доверительность, – то, что не подведет, на что долгое время можно положиться, надежность выражает вещь со стороны сохранения стабильности. Под стабильностью здесь понимается *устойчивое состояние, обладающее способностью к длительному существованию, сохранению во времени.*

По сути своей, надежность – это одно из свойств вещей, но, какова сущность этого свойства?

Согласно рассматриваемой парадигме, отношения свойств представляют собой вещь, которую можно рассматривать как систему свойств, находящихся в иерархии отношений простых и существенных свойств. Совокупность простых свойств группируется вокруг устойчивого целостного единства вещи – существенного свойства, отображающего какую-либо значимую сторону вещи. Например, цвет – это простое свойство. Сочетание цветов и оттенков, композиция и стиль на-

несенных рисунков и шрифтов, пропорции предмета, контуры обвода и пр. – это уже существенное свойство, отображающее эстетическую сторону вещи.

Совокупность простых и существенных свойств вещи образуют главное существенное свойство – качество, которое определяет специфику вещи, выделяющую ее из всех других вещей. Качество, как философская категория – это свойство, выражающее вещь со стороны ее целостного единства, оно является границей данной вещи, с исчезновением этого свойства данная вещь превращается в другую вещь. Различие между качеством и остальными свойствами в том, что без тех или иных свойств вещь существовать может, а уничтожение качества уничтожает вещь, но не аннигилирует ее, а превращает в другую вещь, с другим качеством.

Важно различать и обобщать качество, как философскую категорию, и качество продукции, как «совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением» [ГОСТ 15467-79, статья 3]. Например, «Жигули» и «Мерседес» в философском восприятии качества являются автомобилями, и перестают ими быть, только тогда, когда их ремонт невозможен или нецелесообразен. С позиций качества продукции – это разные автомобили, но только лишь в потребительском восприятии человека, поскольку от этого они не перестают быть автомобилями с позиций философии, как самодвижущиеся машины, управляемые человеком.

Если качество – это свойство, характеризующее целостное единство вещи, значит, должно быть, свойство, характеризующее сохранность целостного единства вещи во времени. По определению, таким свойством является надежность, поскольку исправно работающая вещь в случае отказа по истечению какого-либо времени теряет качество, а ее ремонт возвращает качество вновь, однако, при неустранимом отказе, качество теряется безвозвратно.

Таким образом, надежность – это свойство сохранять качество во времени (для сравнения: *надежность является одним из зависящих от времени аспектов качества* [ИСО 8402:1994, статья 2.5, примечание 2], или *надежность – это качество, развернутое во времени* [10]). Учитывая, что качество – это совокупность свойств вещи, то надежность можно также рассматривать, как свойство сохранять стабильность свойств вещей (для сравнения: *надежность – это сохраняемость объекта в течение заданного промежутка времени в пределах, необходимых и достаточных для обеспечения его работоспособности в режиме эксплуатационных нагрузок* [11]).

По аналогии, безотказность – это свойство непрерывно сохранять качество во времени, или свойство непрерывно сохранять стабильность свойств вещей.

Исходя из сказанного, совокупность всех свойств вещи, включая надежность, как неотъемлемую ее часть, создает качество, делая его уровень достижимым, в то же время надежность выражает достигнутое качество,

как единое целое, со стороны его сохранения во времени. Таким образом, исходя из философского понимания, надежность отражает достижимость определенного уровня качества, и одновременно характеризует сохранение качества во времени.

Первое следствие философского аспекта надежности

Исходя из представленного философского понимания, становится очевидным, что надежность, как свойство присуще исключительно материальным объектам (по А.И. Уёмову, свойство – это отношение вещей). Если обратиться к терминологии, то именно так это и отражено в современном термине «надежность». *Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования* [ГОСТ 27.002-89, таблица 1, статья 1.1]. Учитывая тот факт, что, согласно ГОСТ 25866-83 режимы и условия применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования – это в совокупности есть условия эксплуатации, то под надежностью понимается сохранение в установленных пределах значений параметров технических объектов исключительно при эксплуатации.

Исходя из определения термина «надежность» подразумевается, что, в период от начала до завершения эксплуатации, допускается некоторое снижение уровня значений параметров, влияющих на надежность. Таким образом, чтобы обеспечить заданный уровень надежности на конец эксплуатации, предполагается, что к началу эксплуатации объект должен иметь максимально необходимый для этого исходный уровень надежности. Причем исходный уровень надежности является априори выше текущего. Отсюда риторический вопрос, каким должно быть значение показателя ВБР для УВС на начало эксплуатации, чтобы к концу эксплуатации быть близким к единице?

Как известно, эксплуатация является частью жизненного цикла изделий, которому предшествуют стадии разработки, технологической подготовки производства и производственного цикла. На стадиях разработки и технологической подготовки производства материального объекта еще не существует, можно лишь говорить о существовании различного рода моделей объекта, а на стадии производственного цикла материальный объект только создается, и до сдачи в эксплуатацию его де-факто не существует.

Применительно к УВС возникает парадокс. Изделия, как материального объекта, еще нет, но его ожидаемая безотказность при этом должна быть предельно близкой к единице. На практике это означает, что к началу эксплуатации состояние УВС с позиций надежности должно быть идеальным, при котором отсутствовали бы конструкторские, производственные и эксплуатацион-

ные предпосылки к отказам, т.е. по мере продвижения по стадиям жизненного цикла, его безотказность не должна ухудшаться за счет:

- несовершенств методов проектирования и конструирования, конструкторских ошибок, нарушений требований нормативно-технической документации, нарушений норм и правил конструирования;

- несовершенств и ошибок применяемых технологий;

- дефектов и ошибок изготовления, сборки и монтажа, нарушений технологических процессов изготовления, приработки узлов трения и сборки, ухудшения параметров в результате испытаний, предусмотренных производственным циклом.

Отсюда следует вывод, уже прозвучавший ранее в несколько иной форме: надежность – это не только свойство, но и способность – то, что дает возможность это свойство проявить (терминологически, *способность – это свойство, позволяющее кому-то или чему-то осуществить какое-либо действие*).

Такой аспект дает возможность уже на ранних этапах жизненного цикла, предшествующих эксплуатации, учитывать еще один внешний фактор в обеспечении надежности. Это не что иное, как неточности и ошибки при создании моделей в процессе разработки и технологической подготовки, а также несанкционированные воздействия на физический объект при сборочных работах и техническом обслуживании, в виде вероятности безошибочных действий людей, участвующих в разработке и создании УВС.

Возможность рассматривать надежность как свойство и как способность в зависимости от стадии жизненного цикла, позволяет устранить коллизию терминологий надежности, на которую обращал внимание А.С. Проников. В отечественной литературе термин надежность (*reliability*) чаще всего трактуется, как свойство (*property*), а в англоязычных источниках определяется преимущественно, как способность (*ability*) изделия сохранять во времени заданные функции [8]. Спрашивается, надежность – это все же способность, утверждение в традициях американской школы надежности, или свойство, принятое в советской и российской школе надежности? С позиций рассматриваемого философического аспекта надежности УВС, надежность – это свойство и способность одновременно. При эксплуатации объектов – это, безусловно, свойство. На доматериальных стадиях жизненного цикла объектов, включая ожидание эксплуатации – это, конечно же, способность.

На важность учета надежности объектов на доматериальных стадиях жизненного цикла обращал внимание А.Н. Туполев: «Чем дальше от доски конструктора обнаруживается ненадежность, тем дороже она обходится». Эту же мысль выразил В.И. Куренков в формуле соотношения затрат на исправление ошибок при проектировании 1:10:100:1000 (проектирование: отработка: серийное производство: эксплуатация) [10]. На исправление проектной ошибки, если она выявлена

сразу, требуется столько же средств, сколько потрачено на ее «свершение». На последующих стадиях жизненного цикла устранение проектных ошибок увеличивает затраты на порядки.

Для УВС указанная ситуация обостряется еще тем, что с учетом суммарной стоимости ракеты-носителя и КА, частичное или полное нарушение работоспособности последнего из-за отказа «грошового» элемента раскрывающихся конструкций – роскошь непозволительная, а в отдельных случаях – недопустимая. В частности, при отказе механических систем раскрытия БС, например, из-за несрабатывания всего лишь одного замка зачековки, финансовые последствия оцениваются не себестоимостью отказавшего элемента, а ущербом, исчисляемым базовой стоимостью транспортной системы доставки, что для КА типа «Экспресс-АМ5», «Экспресс-АМ6» в составе ракеты-носителя «Протон-М» составляет около 8,35 млрд. руб.

По указанным причинам, состояние УВС как способность, позволяющая ожидать проявления свойства надежности еще до начала эксплуатации, является определяющим, поскольку любая ошибка еще на первой стадии жизненного цикла лишает смысла всю дальнейшую деятельность. Пример тому – китайский КА Sinosat-2, запущенный 29 октября 2006. После выведения на орбиту из-за конструкторско-технологических ошибок панели БС и телекоммуникационные антенны не раскрылись, в результате КА был потерян, так и не начав свою работу.

Второе следствие философического аспекта надежности

В парадигме А.И. Уёмова вещь определяется отношением свойств. Совокупность отношений образуют систему, которую можно рассматривать как систему свойств качества или, с учетом иерархичности систем, как множество подсистем свойств качества. Исходя из этого, свойство надежности УВС предлагается рассматривать как систему конечного числа свойств качества изменяющихся во времени.

Любые свойства, проявляющие нестабильность во времени, могут быть обнаружены методами системного анализа, различены качественно и определены количественно с помощью величин [12]. Для поворотного устройства штанги магнитометра КА в работе [1] проведен подробный анализ таких свойств, включающих свойство обеспечивать свободу вращения в шарнире в любом угловом положении штанги, свойство обеспечивать энергетическую достаточность для поворота штанги на полный угол разворота, свойство обеспечивать беспрепятственное движение штанги по заданной траектории, и т.п.

Важно отметить, что данный философический подход дает возможность учитывать не только свойства, которые можно определить с помощью параметров, но и те, которые никак кроме как показателями не определяются, или могут быть определены в равной степени, как параметрами, так и показателями. Под параметрами здесь понимаются величины, интенсивность которых

может быть непосредственно измерена техническими средствами или вычислена (длина, сила, момент и т.д.), а под показателями – вычисленные обобщающие данные, по которым можно судить о состоянии рассматриваемого свойства или параметров (коэффициент запаса прочности, коэффициент запаса движущего момента, ВБР, вероятность и т.д.). Оперирование параметрами и показателями позволяет выбирать удобные для характеристики свойств величины, например, для определения стойкости прочности можно использовать:

- значения действующих нагрузок (параметры), если по ним можно однозначно судить о напряженно-деформированном состоянии;
- значения действующих напряжений (параметры), если необходимо различать состояния прочности;
- коэффициенты запаса прочности (показатели), если рассматривается сложное напряженное состояние.

Использование показателей позволяет учитывать дополнительно такие свойства, которые могут быть различимы только качественно в «бинарной» форме: «ноль-единица», «да-нет», или характеризоваться исключительно показателями надежности, например, ВБР.

С учетом сказанного, совокупность свойств качества может быть представлена неким пространством параметров УВС в виде системы показателей и параметров (1):

$$F = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k), \quad (1)$$

где $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ – показатели или параметры, характеризующие свойства качества УВС; k – общее число свойств качества УВС.

Работоспособное состояние УВС определяется условием нахождения ее показателей и параметров в области допустимых состояний пространства качества. Область работоспособного состояния УВС определяется множеством элементов составляющих свойство качества (1), каждый из которых удовлетворяет условию нахождения значений показателей и параметров в границах своих предельно допустимых изменений:

$$D_x = \left\{ X_i \mid X_{\min(i)} \leq X_i \leq X_{\max(i)} \right\}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (2)$$

где X_i – значения величин показателей или параметров i -го свойства; $X_{\min(i)}, X_{\max(i)}$ – предельно допустимые границы значений показателей или параметров i -го свойства.

Уравнение (2) в полной мере характеризует качество УВС. Надежность же УВС, как отмечалось выше, является свойством сохранять качество во времени и определяется вероятностью пребывания элементов множества $X_i(\tau)$ в допустимой области качества D_x в течение интервала времени $0 \leq \tau \leq t$:

$$H(t) = P[X_i(\tau) \in D_x; 0 \leq \tau \leq t], \quad (3)$$

где $P(A)$ – вероятность наступления события A .

Для УВС, элементы которых, как правило, являются точками единичного отказа, формулу (3) можно привести к виду (4):

$$H(t) > \prod_{i=1}^k P_i(t), \quad (4)$$

$$\text{здесь } P_i(t) = P[X_{\min(i)} \leq X_i(\tau) \leq X_{\max(i)}; 0 \leq \tau \leq t].$$

Формулы (2) и (4) указывают на возможность уже на самых ранних стадиях жизненного цикла УВС формировать такие конструкторские и технологические требования на разработку, которые обеспечивают выполнение заданных показателей качества и надежности. Методы и практические примеры установления таких требований для УВС приведены в работах [1, 13]. Процесс конструкторско-технологической деятельности по обеспечению заданной надежности, согласно представленному философскому подходу, сводится к следующему алгоритму:

- установление необходимых и достаточных требований к конструкции, обеспечивающих ее работоспособность в заданной области допустимых состояний пространства качества;
- обоснование вероятности сохранения установленных требований во времени при заданных условиях эксплуатации;
- осуществление организационно-технических и организационно-методических мероприятий по выполнению установленных требований;
- контроль выполнения указанных требований на всех стадиях жизненного цикла.

Выводы

1. Предложенный подход к представлению о надежности на основе рассмотренного философского аспекта на примерах УВС не противоречит основным сложившимся понятиям и методам теории и практики надежности, в то же время он позволяет решать задачи надежности без использования вероятностных и статистических методов расчетов показателей надежности.

2. Современный общепринятый термин «надежность» согласно ГОСТ 27.002-89 не в полной мере отражает специфику решения задач УВС в части применения понятий «свойство-способность» и «параметр-показатель». В то же время, умение различать указанные понятия представляет существенные преимущества при обеспечении надежности УВС, в частности, позволяет:

- равномерно распределять внимание разработчика УВС по стадиям жизненного цикла для достижения предельного исходного уровня надежности и снижения различного рода предпосылок к отказам уже на самых ранних стадиях их создания;
- учитывать свойства УВС, которые могут быть оценены только степенью уверенности в их проявлении в виде вероятности наступления «бинарного» события в форме «да-нет». Это важно, например, при оценке такого свойства, как свойство обеспечить беспрепятственное

движение звеньев поворотной конструкции по заданной траектории. Своевременный учет и надлежащая оценка данного свойства наверняка предотвратила бы зацепление панели БС корабля «Союз-1» за маты экранно-вакуумной теплоизоляции, что позволило бы панели беспрепятственно раскрыться;

– учитывать свойства элементов УВС, которые можно определить на основе статистических выборок. Например, часто в качестве инициаторов начального срабатывания КТМС используются пиротехнические средства. Основу указанных средств составляют пиропатроны – продукция массового производства, имеющая нормированные значения показателя безотказности, которые можно использовать в формулах (1-4).

3. Философское понимание надежности, как свойства сохранять качество во времени, позволяет выстроить логическую связь между ожидаемым показателем безотказности УВС в целом, и отдельными показателями и параметрами свойств качества. Это открывает ряд ранее недоступных возможностей:

– варьируя значения частных ВБР, характеризующие нахождение значений показателей и параметров тех или иных свойств в допустимой области, можно добиться достижения заданных значений ВБР системы в целом. Задача, что нужно практически изменить в конструкции конкретной УВС, чтобы повысить ее безотказность, положим, с трех девяток до четырех девяток, получает конкретный алгоритм решения на основании формул (1-4). Для этого, исходя из уровня значений частных ВБР, требуется найти «слабое звено» в системе свойств качества объекта и принять меры по его усилению, например, осуществить пересмотр конструкторско-технологических требований безотказности с корректировкой границ диапазонов показателей или значений параметров, поменять, по возможности, структурную модель надежности, изменить принятые конструктивные решения и т.п.;

– инженерные расчеты получают свое надлежащее место в методологии обеспечения надежности, поскольку системный анализ свойств качества, изменяющихся во времени, задает необходимость или целесообразность проведения тех или иных инженерных расчетов, что исключает фактор субъективности при их выборе. Расчеты надежности уподобляются аддитивному учету результатов инженерных расчетов в обеспечение сохранения тех или иных свойств качества во времени. Невыполнение тех или иных инженерных расчетов при разработке УВС приводит к неопределенности степени доверия к итоговой цифре надежности;

– конструктор получает возможность своевременно устанавливать те или иные конструктивные требования с осознанием их влияния на заданные требования надежности.

Заключение

В настоящей статье, с позиций философии, представлен подход к решению практических задач безотказности УВС на основе теории надежности механических систем

В.В. Болотина [5, 6] с учетом их специфики – невозможности использования вероятностно-статистических методов принятия решений.

В отличие от теории надежности абсолютно надежных систем А.М. Половко и С.В. Гурова [3], отрицающих возможность проведения расчетов для технических систем с ВБР больше 0,999, философское понимание надежности дает ключ к проведению количественных оценок надежности УВС. Такие оценки должны быть использованы как процедуры анализа для подтверждения достаточности принятых мер по обеспечению безотказности, из которых бы следовали практические выводы, жизненно необходимые для принятия решений в повседневных задачах, стоящих перед конструкторами.

Литература

1. **Похабов Ю.П., Ушаков И.А.** О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 11. – С. 50-56.
2. **Похабов Ю.П.** Обеспечение надежности крупногабаритных трансформируемых механических систем // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф. – Красноярск: СибГАУ, 2014. Ч. 1. – С. 95-97.
3. **Половко А.М., Гуров С.В.** Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. **Болотин В.В.** Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1969, № 5, С. 74-81.
5. **Болотин В.В.** Теория надежности распределенных механических систем // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1969, № 6, С. 72-79.
6. **Болотин В.В.** Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 255 с.
7. **Щурин К.В.** Проблема надежности в философском аспекте [Электронный ресурс] // Credo New: Теоретический журнал. 2002. – № 4.
8. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
9. **Уёмов А.И.** Вещи, свойства и отношения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 184 с.
10. **Куренков В.И., Капитонов В.А.** Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 320 с.
11. **Ван-Желен В.** Физическая теория надежности. – Симферополь: Крым. – 1998. – 318 с.
12. Об утверждении положения о единицах величин, допускаемых к применению в РФ / Постановление Правительства РФ от 31.10.2009 г. № 879.
13. Конструкторско-технологическое обеспечение безотказности трансформирования механических устройств одноразового срабатывания космических аппаратов: дис. ... кандидата технических наук: 05.07.02 / Ю.П. Похабов. – Красноярск, 2013. – 173 с.