



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 621.01-192:[531.1+531.3]

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук, профессор
заместитель генерального директора по научной работе
E-mail: vladimir.algin@gmail.com

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.04.2016.

ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫЕ ИЗДЕЛИЯ: ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКА, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, ОХРАНА ПРАВ. ЧАСТЬ 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Статья продолжает опубликованную в предыдущем номере первую часть, в которой проанализированы причины снижения конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции и рассмотрена общая схема создания инновационных технически сложных изделий (ТСИ). Во второй части приведены количественные данные, связывающие указанные в названии статьи факторы с экономическим ростом при создании инноваций. Описаны особенности машиностроительных изделий, отличающие их от электротехнических объектов в области надежности. Долговечность относится к основным свойствам ТСИ. У электротехнических изделий основным свойством является готовность. Эти отличия должны быть отражены в сфере стандартизации. Проанализированы два главных направления развития механики: динамическое и прочностное, и показана необходимость их интеграции на основе ресурсной механики машин (РММ). Рассмотрены подходы к расчету надежности технических изделий в рамках прочностной механики, структурной (математической) и физической (механической) теорий надежности. Продемонстрированы ограниченные возможности этих подходов при расчете сложных механических объектов. Методологию и методы расчета надежности ТСИ на основе положений РММ и общие выводы планируется представить в заключительной части работы.

Ключевые слова: технически сложные изделия, конкурентоспособность, качество, стандартизация, научные исследования, механика, надежность, патентно-информационное обеспечение

Введение. В первой части [1] представлен анализ проблемы создания технически сложных изделий (ТСИ). Недавно опубликован Доклад ВОИС о положении в области интеллектуальной собственности в мире за 2015 год [2]. Ряд положений этого доклада созвучен с выводами [1] о роли научных исследований и объектов интеллектуальной собственности при создании инноваций. В докладе показано, что связь инноваций и исследовательской деятельности с годами становится все более тесной. Среди обладателей патентов в таких сферах, как трехмерная печать, нанотехнология и робототехника, доля научно-исследовательских организаций выше, чем в разработках, касающихся изобретений, изменивших ход истории (самолет, антибиотик и полупроводник).

Применительно к Беларуси краткий анализ роли научных исследований в создании инновационной продукции проведен К. Рудым в [3]. Указано: «Не-

большие расходы на научные разработки и в целом недостаток стимулов для инновационного развития не позволяют белорусским экспортерам в конкурентной борьбе делать акцент на снижение себестоимости и повышение качества. Например, доля затрат на научные исследования во всех затратах крупных белорусских экспортеров (МТЗ, БелАЗ) в разы меньше, чем у их конкурентов (John Deere, Caterpillar). В абсолютных цифрах (в долларовом выражении) расходы на инновации отличаются в тысячи раз. У белорусских экспортеров нет научно-исследовательских центров за рубежом для анализа и прогнозирования рынка, требований потребителей, корректировки технологий и производства. Например, John Deere имеет научно-исследовательские центры в Германии (100 чел.), Франции (120 чел.), Китае, Индии, США».

Таким образом, факторы, действующие на макроуровне, обозначены. Вместе с тем возможности эффективного использования ресурсов, связанных

с НИОКР, стандартизацией и сферой охраны прав, при создании конкурентоспособных изделий не исчерпаны. Исследованию этих возможностей, основанных на современных научных знаниях, посвящена вторая часть работы.

Стандартизация, ее роль в создании инноваций и их продвижении на рынок (на примере Германии). В рекомендациях Немецкого института по стандартизации (нем. Deutsches Institut für Normung e.V) DIN [4] отмечается, что участие в работах по стандартизации должно быть частью технологической и производственной стратегии любой компании.

Пример положительного воздействия стандартов на бизнес в области автомобильной промышленности [4]. Автомобиль Volkswagen 2000 «Golf» включает 16 897 комплектующих. Четвертая часть из них была стандартизована как «взаимозаменяемые комплектующие», которые могут быть использованы в других моделях. Поскольку стоимость изготовления взаимозаменяемых комплектующих на 20–60 % ниже, чем стоимость других типов комплектующих, они являются основным фактором снижения стоимости автомобиля в целом.

Немецкая стратегия стандартизации [5] включает среди прочих следующие положения:

- стандартизация увеличивает внутренний и международный поток товаров и услуг, а также устраняет технические барьеры в торговле путем гармонизации требований и к материальным, и к нематериальным товарам. Она способствует *быстрому распространению технических знаний и новшеств*, усиливая конкуренцию в бизнесе. Стандартизация является также исключительно важной и для индивидуальных участников экономических процессов, так как тот, *кто создает стандарты, контролирует рынок*.

- стандарты должны основываться на *объединенных результатах* науки, технологии и опыта и ставить своей целью содействие оптимальным выгодам для общества.

Национальные немецкие стандарты носят *рекомендательный характер*. Вместе с тем они рассматриваются как «общепринятые правила техники». В сфере производства применение стандартов считается мерой безупречного технического поведения.

Вклад стандартов, патентов и лицензий в экономический рост. Точный учет вклада знаний в экономику затруднителен. Однако существуют индикаторы для приближенной оценки знаний. Ими служат данные о количестве действующих в стране стандартов, патентов, а также о лицензионных платежах иностранным владельцам прав на интеллектуальную собственность (например, программное обеспечение). Для оценки экономического роста с учетом индикаторов знаний в работе [6] за основу взята модель (функция) Кобба–Дугласа, в которую, помимо классических факторов капитала и труда, введены упомянутые индикаторы и некоторые другие факторы. В результате в качестве основных изменяющихся во времени

параметров модели использованы валовые вложения в основной капитал (капитал), число занятых (труд), патентный фонд, число выданных лицензий и количество стандартов. Выполненные расчеты показали, что модель достаточно адекватно отображает реальное изменение экономического роста Германии в период с 1961 по 2006 гг. Чем обширнее фонд стандартов, тем выше диффузионный эффект технологического знания и тем динамичнее экономический рост. Вклад стандартов сопоставим по эффективности с воздействием импортируемых из-за границы иностранных знаний (лицензий) и только вдвое меньше воздействия патентов.

Вклад стандартов в экономический рост Германии показан на рисунке 1. Отрицательные значения вклада в период с 1986 по 1990 год объясняются ревизией системы действующих стандартов. В объединенной Германии вклад стандартизации вновь приобретает положительную динамику и в пятилетний период с 2002 по 2006 год достигает 16,77 млрд. евро.

Исследования, проведенные в Германии, инициировали аналогичные исследования в других странах. Эти исследования дали сопоставимые результаты. Во Франции и Германии (актуализированные данные 1997–2006 год) вклад стандартов составил от 0,7 до 0,8 % валового внутреннего продукта, в Великобритании и Канаде — от 0,2 до 0,3 %.

Положительное действие стандартов выходит за рамки чисто экономической эффективности (обеспечение безопасности на рабочих местах, защита окружающей среды и т. д.) [6].

Основные факторы обеспечения конкурентоспособности. Связь процессов стандартизации и патентной сферы с этапами жизненного цикла изделия, в первую очередь с НИР и ОКТР, при создании конкурентоспособных изделий иллюстрирует рисунок 2. В дальнейшем представленные на рисунке процессы и факторы рассматриваются более подробно применительно к ТСИ.

Конкурентоспособность, качество, надежность ТСИ. Конкурентоспособность технически сложного изделия определяется многими факторами, из числа которых наибольшее значение для ТСИ имеют патентно-правовые факторы, соответствие качества продукции требованиям рынка, наукоемкость, стоимостные факторы.

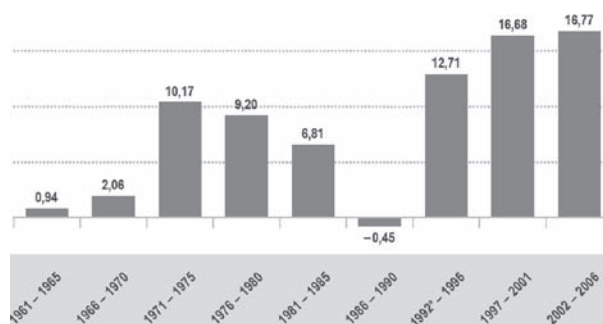


Рисунок 1 — Вклад стандартов в экономический рост Германии, млрд. евро (источник: собственные расчеты авторов [6]; ввиду объединения Германии достоверные данные за 1991 год отсутствуют)

Патентно-правовые факторы — патентная чистота и патентоспособность — являются необходимыми нормативными условиями обеспечения конкурентоспособности продукции. Продукция, не обладающая патентной чистотой, не может законным образом размещаться на рынке.

Качество изделия. Основная проблематика, связанная с качеством и надежностью продукции, представлена на рисунке 3. Качество, как совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности (определение ИСО), охватывает несколько аспектов.

Сочетание терминов «качество» и «надежность» не означает, что надежность рассматривается вне качества, а подчеркивает значимость этой характеристики. Близкими к надежности и связанными с ней понятиями являются «безопасность» и «риск».

Менеджмент качества ориентирован на организационно-управленческие решения, обучение кадров, контроль конечной продукции. Направления (процессы) «надежность», «безопасность» и «риск» основаны на анализе изделия, его технической сущности, изучении взаимодействия изделия с окружающей средой, то есть они являются техническими либо организационно-техническими.

Безопасность и надежность не связаны прямым образом (см. рисунок 3). ненадежные изделия могут быть безопасными, если их отказы не приводят к опасным событиям. Вместе с тем безопасность предусматривает анализ отказов и их последствий. Для количественных оценок опасности используется понятие *риска*. При оценках безопасности анализируется риск. Принципиальным моментом при анализе риска является понимание его дуалистической природы. Любые качественные и количественные методы расчета степени риска основаны на использовании двух параметров, которые позволяют охарактеризовать каждый фактор риска. Одним из этих параметров является тяжесть вреда, хотя некоторые методы расчета основаны на использовании частоты его нанесения. В качестве второго параметра используется вероятность нанесения вреда.

Требования безопасности содержатся в технических регламентах Таможенного союза и обязательны

для выполнения изготовителями ТСИ. Надежность изделия реализуется производителем исходя из его возможностей с учетом обеспечения определенного уровня конкурентоспособности изделия. Показатели надежности должны приводиться в технических условиях на конкретные изделия (группы изделий). Они служат, в том числе, для разрешения претензий потребителя в случае преждевременного выхода изделия из строя. При этом обеспечению надежности обычно придается самостоятельное значение (см., например, [7]).

Показатели надежности изделия, в отличие от требований безопасности, не являются обязательными для выполнения изготовителем. Однако для отдельных видов техники или групп изделий показатели надежности приведены в стандартах. Так [8] устанавливает номенклатуру и значение показателей надежности сельскохозяйственной техники.

Научеваемость изделия определяется его соответствием последним достижениям науки и техники. Научеваемость ТСИ обеспечивается на этапах НИР и ОКТР. Для оценки научеваемости необходимы *патентно-информационные исследования* (ПИИ).

Надежность и стоимостные показатели связаны сложным образом. Для повышения надежности могут использоваться более дорогие комплектующие изделия, материалы, сырье, технологические процессы изготовления деталей, что повышает себестоимость изделия. При этом возможно снижение затрат на возмещение рекламаций, других затрат изготовителя, а также стоимости владения изделием у потребителя.

Стандарты в области качества и надежности. В настоящее время происходит взаимная увязка понятий, включение аспектов безопасности в содержание стандартов, относящихся к надежности и риску.

Риск все чаще используется при оценках безопасности. Известны его разные трактовки. Например, «...«риск» — сочетание вероятности причинения вреда и последствий этого вреда для жизни или здоровья человека, имущества, окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений» [9].

Оценка риска проводится качественными либо количественными методами (способами). *Качественные способы* более просты, чем количественные. Характерными являются качественные способы, основанные на применении матрицы рисков; графа рисков; балловой системы [10]. Эти значения получены различными экспертными оценками качественного характера, затем ранжированы для придания этим оценкам числовой формы. Они не могут быть



Рисунок 2 — Обеспечение конкурентоспособности изделий



Рисунок 3 — Место надежности в проблематике «Качество»

использованы для сравнения с результатами оценки, произведенной другим способом.

В основе *количественных способов* расчета лежат математические вычисления, которые выполняются с использованием имеющихся исходных данных о вероятности наступления тех или иных последствий за определенный интервал времени.

Таким образом, основная научная составляющая в сфере качества продукции связана с исчислением вероятностей наступления событий, оценкой безотказности и ресурса изделий, что относится к *теории и практике надежности и отработки в стандартах по надежности изделий*.

Разработка международных стандартов по надежности является сферой деятельности МЭК (Международной электротехнической комиссии, IEC). Отдельные стандарты по надежности разрабатываются совместно МЭК и ИСО.

За последний год (февраль 2015—февраль 2016 гг.) технический комитет МЭК ТК 56 «Надежность» подготовил и выставил на обсуждение экспертов из стран, входящих в МЭК, в том числе экспертов из Беларуси 12 стандартов.

Видно, что разрабатывается примерно один стандарт в месяц. Даже простой перевод или адаптация такого количества стандартов в качестве национальных — сложная задача для многих стран. К тому же возникает вопрос, насколько стандарты МЭК, ориентированные на электротехнические изделия, правомерно или допустимо распространять на всю область технических изделий, например, на машиностроительную продукцию.

Позиция России по этому вопросу сформулирована в базовом российском стандарте ГОСТ Р 27.001-2009 [11]: «А.4 Развитие и совершенствование системы стандартов должно осуществляться на основе их гармонизации с международными стандартами, разрабатываемыми техническим комитетом МЭК ТК 56 «Надежность» при активном участии в разработке международных стандартов».

Вместе с тем, в период с сентября 2015 г. по февраль 2016 г. российскими организациями подготовлены в области надежности проекты следующих ГОСТов:

- Надежность в технике. Оценка и расчет запасов в комплексах ЗИП;
- Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности;
- Обоснование безопасности оборудования. Рекомендации по подготовке;
- Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения;
- Надежность в технике. Термины и определения.

Из этого следует, что Россия проводит достаточно активную самостоятельную линию при разработке межгосударственных стандартов, не копируя МЭК.

В нашей стране пока нет сбалансированной системы стандартов в рассматриваемой сфере. Появление новых стандартов в последнее время в ос-

новном сводится к рассмотрению и принятию (или отклонению) проектов ГОСТов, подготавливаемых российскими специалистами.

Ключевые термины, относящиеся к надежности технически сложных изделий. Изделие (Item) — единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках (экземплярах) [12].

Примечание. К числу характерных признаков изделия относится расход его ресурса при эксплуатации. Другие виды промышленной продукции, например, пищевая продукция, топливо, смазочные масла и т. д. потребляются прямым образом: их количество уменьшается при потреблении (эксплуатации объекта техники). Программное обеспечение может входить в состав изделия, но рассматриваться самостоятельно в качестве изделия не может.

Такая трактовка позволяет отличать изделие от другой продукции, измеряемой в единицах массы, объема, длины и т. п. Изделие может быть сложным в результате сборки, других операций объединения простых изделий.

Особое место занимает программное обеспечение, информационные массивы. В международных стандартах МЭК и копирующих их национальных стандартах под изделием (item) может пониматься также *программное обеспечение*.

В части целесообразности отнесения программного обеспечения к изделиям можно обратиться к патентному праву. В Гражданском кодексе Российской Федерации указывается (Статья 1350. Условия патентоспособности изобретения): «5. Не являются изобретениями, в частности:...5) программы для ЭВМ; 6) решения, заключающиеся только в представлении информации».

В соответствии с настоящим пунктом исключается возможность отнесения этих объектов к изобретениям только в случае, когда заявка на выдачу патента на изобретение касается этих объектов как таковых».

Закон Республики Беларусь от 16 декабря 2002 г. № 160-З «О патентах на изобретения, полезные модели, промышленные образцы» содержит Статью 2. «Условия предоставления правовой охраны изобретению», в которой указано: «2. Не считаются изобретениями: ... алгоритмы и программы для электронно-вычислительных машин; простое представление информации».

Названные объекты и виды деятельности не считаются изобретениями в соответствии с настоящим Законом только в случае, если заявка на изобретение касается лишь этих объектов и видов деятельности как таковых».

Таким образом, из предлагаемой трактовки понятия изделия как предмета машиностроительной сферы следует, что *программное обеспечение может входить в состав изделия, но рассматриваться самостоятельно в качестве изделия не может*.

Технически сложное изделие (Technically complicated item) — изделие, имеющее иерархическую структуру, большое число компонентов, в том

числе различной физической природы, например, механические, гидравлические, пневматические, электронные, электрические и другие компоненты, предназначенные для применения в варьируемых условиях и режимах эксплуатации.

Примечания: 1. Типовыми ТСИ являются: колесные транспортные средства; сельскохозяйственные тракторы и прицепы к ним, мотоблоки и мотокультиваторы, комбайны и другие сельскохозяйственные машины и оборудование (сельскохозяйственная техника); лесохозяйственные тракторы и прицепы к ним; двигатели внутреннего сгорания; мелиоративная, дорожно-строительная, коммунальная и землеройная техника; основное технологическое (промышленное) оборудование серийного (массового) производства. 2. Рабочий процесс ТСИ выполняется под управлением специально подготовленного оператора (водителя) либо системы автоматического управления.

Надежность (Dependability) — свойство изделия 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. *Примечание:* надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств (такое определение соответствует [15] и отличается использованием термина «изделие» вместо термина «объект»).

Тракторы надежности по ГОСТ 27.002-89 [25] можно назвать *технической*, а тракторы МЭК — *электротехнической*, относящейся к электротехнике. Два существенных отличия между тракторами состоят в следующем:

1. Первое существенное отличие — отсутствие в международных стандартах по электротехнике свойства «долговечность» в числе основных свойств.

В ГОСТе 27.002-89 *долговечность относится к числу основных свойств*, которые определяют комплексное свойство «надежность» (см. приведенное выше определение термина «надежность» в [13]).

2. Центральное место в концепции надежности в *международных стандартах* МЭК отводится понятию «готовность» (*availability*) [14]: «готовность (объекта) — способность находиться в состоянии функционировать так как требуется. *Примечание:* 1. Готовность зависит от результирующих характеристик безотказности, восстанавливаемости и ремонтпригодности объекта, а в некоторых случаях от обеспеченности техническим обслуживанием и ремонтом» (перевод наш).

В ГОСТе 27.002-89 [13] *готовность как отдельное свойство* (наряду с безотказностью, долговечностью и т. д.) не рассматривается. Вместе с тем в разделе «Комплексные показатели надежности» даны

определения ряда комплексных показателей, среди которых: «Коэффициент готовности [(Instantaneous) availability function] — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается». Кроме этого комплексного показателя, другие простые показатели, относящиеся к готовности, не присутствуют, и это свойство отдельно не выделяется.

С учетом сказанного целесообразно:

- «узаконить» *две трактовки* надежности: для технической (машиностроительной) сферы — по ГОСТ 27.002-89, и для электротехнической сферы — в соответствии с трактовкой МЭК;

- использовать в каждом конкретном случае ту из них, которая в большей степени имеет отношение к исследуемому объекту.

В рассматриваемом случае для ТСИ следует использовать техническую (машиностроительную) трактовку надежности. В электротехнической сфере широко распространены модели отказов элементов, основанные на постоянстве интенсивности их отказов, что неприемлемо для машиностроительных объектов.

Научные исследования в области механики и надежности: научный фундамент создания ТСИ. Базовые идеи и методы классической механики являются источниками двух основных научных направлений в современной механике (рисунок 4).

Первое направление («Сила, ускорение, движение») рассматривает вопросы оценки и обеспечения свойств объектов, связанных с их движением (функционированием). В рамках этого направления в настоящее время происходит типизация систем и подходов к решению задач их динамики. Выделяются отдельные системы, обладающие характерными особенностями поведения и, соответственно, моделирования. Так, система, в которой массы совершают большие перемещения, квалифицируется (в отличие от конечно-элементной системы) как «Multibody system» («Многомассовая система») [15].

В классическом представлении первого направления предполагалось, что конфигурация механической системы известна и под действием сил не изменяется. Современные механические объекты *могут изменять свои конфигурации или состояния*, например, при действии сил трения или внешних и внутренних факторов. Как результат — изменяется направление потоков мощности в объекте. Типичные представители таких систем — транспортные средства и другие механические объекты. Для описания их поведения целесообразно в уравнениях движения использовать скорости компонентов вместо перемещений, поскольку перемещения быстро накапливаются в процессе нагружения. Важная задача — определение нагрузок, действующих на компоненты.

В подходах ресурсной механики машин (РММ) по рассматриваемой тематике разработан ряд положений

и методов, относящихся к корректной схематизации машин и расчетам динамических процессов в них. Так, в работах [16, 17] представлена концепция «регулярных динамических схем (конструктивов)», представляющих собой промежуточные символические (графовые) объекты, которые служат для перехода от начальной механической модели к математической модели объекта. В работе [18] транспортное средство представлено механической системой, включающей вращательные, поступательные, вращательно-поступательные динамические схемы и соединительные устройства для инерционных частей. Особое внимание уделяется регулярным динамическим схемам, сформированным из регулярных структур (конструктивов), которые формализуют описание различных устройств, имеющих одинаковые математические модели.

В развитие указанных работ в настоящее время в рамках РММ разрабатывается более *радикальный подход* [19–23]. Уже на стадии исходной схематизации целесообразно выделять и использовать свойства регулярности, которые присущи техническим объектам. Предлагается схематизировать объект механики *в виде регулярной механической системы*, то есть объектной механической модели, состоящей из элементарных механических компонентов (масс, упругих звеньев, демпфирующих элементов, фрикционных пар, разнообразных соединений и т. д.), соединенных по определенным правилам. Развиваемый подход основывается на следующих положениях.

Положение 1 «О схематизации»: механическая система, как исходный этап схематизации объекта механики, представляет собой совокупность *основных звеньев* (сосредоточенных масс) и *безынерционных устройств*, которыми эти массы соединяются. Массы могут вступать в *контактное взаимодействие*.

Положение 2 «Об изменении состояния контакта»: при возникновении условий, в которых возможен переход к новому состоянию контактирующих масс (например, замыкание или размыкание фрикциона), указанное состояние должно быть представлено в расчете хотя бы на одном шаге вычислительного процесса.



Рисунок 4 — Классическая механика — источник современных научных направлений

Положение 3 «Об учете направления потоков силовых факторов в неидеальных устройствах»: в ходе динамического расчета механической системы необходима предварительная операция определения направления силовых потоков, проходящих через неидеальные устройства.

Использование компьютера как дискретного вычислительного устройства имеет принципиальное значение для отображения аналоговых быстропротекающих процессов в механических системах с переменной структурой. Эта особенность придает *качественно новый характер* расчету механических систем по сравнению с классическими аналитическими методами расчета.

Более подробное описание особенностей данного подхода в РММ, основанного на концепции регулярной механической системы, представлено в работах [19–23].

Второе направление («Сила, напряжение, повреждение/разрушение») (рисунок 4) можно охарактеризовать как «прочностную механику». В конечном счете оно связано с оценкой и обеспечением надежности изделий.

Прочностная механика. Прочностная механика имеет дело с напряжениями компонентов машин для оценки прочностных свойств и лишь в отдельных случаях оперирует ресурсами. Это направление отражает сложившийся курс «Детали машин» в технических вузах и соответствующие ему методы, представленные в справочниках, монографиях и учебниках [24–26].

В целом «прочностная механика» напрямую не связана с теорией надежности. В рамках «прочностного» подхода в работе [27] ее автор предлагает новую парадигму науки о прочности, основной смысл которой заключается в том, что «прочность технических объектов, ее элементов и материалов обеспечивается системой». Как будет показано ниже, на сегодняшний день это предложение практически реализовано путем разработки методов, методик и программных средств расчета применительно к мобильным машинам в рамках направления «Ресурсная механика машин», его ресурсной тематики.

Теория надежности. Эта новая наука, возникшая как ответ на проблемную ситуацию: почему техническая система, состоящая из многих надежных элементов, оказывается ненадежной? Традиционная (структурная) теория надежности — математическая дисциплина, у которой нет связей с механикой как наукой, оперирующей силами, напряжениями, коэффициентами запаса. Однако в последнее время все шире в различных областях техники требования к машинам и конструкциям, особенно состоящим из многих компонентов, определяются путем задания показателей надежности, а не коэффициентов запаса для типовых расчетных случаев. Это связано с тем, что нет вечных объектов техники, любой объект когда-нибудь разрушается. С этой позиции коэффициенты запаса лишены смысла. Кроме того, показатели надежности

отражают реальную вероятностную природу прочностных (надежностных) свойств технических объектов.

В справочниках, монографиях и учебниках с названием «Надежность технических систем» преобладают подходы математической (структурной) теории надежности, для которой в качестве исходных данных являются заданными распределения наработок до отказа элементов. По этим данным определяются показатели надежности системы. Реальными техническими объектами, для которых пригоден подобный подход, являются электронные системы [28, 29].

В [28] отмечается, что теория надежности, ее методы расчетов и экспериментальных оценок междисциплинарны по своей сути. Общие методы теории надежности, разрабатываемые в основном применительно к радиоэлектронным системам, могут быть с успехом использованы и в других отраслях техники и народного хозяйства. В то же время отдельные отрасли — радиоэлектроника, информатика, машиностроение, строительство, энергетика — порождают интересные конкретные ответвления теории надежности со своими специфическими особенностями, иногда со своими специальными математическими методами исследования.

Физическое (механическое) направление в теории надежности. Это направление основывается на использовании физических моделей для описания процессов отказов изделий. Применительно к машинам названия публикаций обычно содержат сочетание «надежность (ресурс) машин» [30], [31]. В работах данного направления при постановке задачи рассматривают машину как систему, а практические расчеты надежности сводят к расчету одного из лимитирующих компонентов либо к перемножению вероятностей безотказной работы независимых элементов.

В области расчета надежности автотракторной техники следует отметить работу [32]. Она выгодно отличается от других работ, в том числе относящихся к физическому (механическому) направлению достаточно подробно разработанным расчетом надежности сборочной единицы машины. Расчет начинается с уровней нагружения компонентов ведущего моста автомобиля и завершается оценкой его надежности как системы с несколькими лимитирующими элементами, что важно, поскольку подобные примеры в литературе практически отсутствуют. Работа во многом характеризует уровень расчетов сборочных единиц машин на надежность. Ниже рассматриваются ее основные положения и анализируются приписанные им методические недостатки.

1. В расчете используется «обобщенный нагрузочный режим редуктора в виде распределений ординат и амплитуд крутящего момента на полуоси и средней интенсивности нагружения» [32], то есть вариация нагрузочных режимов от машины к машине не учитывается. При этом не устанавливается, какой степени тяжести соответствует принятый нагрузочный режим для различных рассчитываемых деталей и их предельных состояний (режим нагружения не может

иметь одинаковую степень тяжести для всех элементов). Одни и те же распределения ординат и амплитуд крутящего момента могут оказаться тяжелыми, например, для зубчатых колес и подшипников, и легкими для валов. Это связано с тем, что у зубчатых колес и подшипников циклы нагружения формируются в основном за счет их вращения. Чем выше уровни момента в трансмиссии, например при движении машины на подъем, тем выше нагруженность этих элементов. У валов характер нагружения иной, для них важны в большей степени амплитуды и число циклов колебаний крутящего момента. При движении на подъем величина амплитуд и число циклов нагружения может быть невелико. В результате нагрузочные режимы вращающихся деталей и валов могут существенно отличаться.

2. Проведение расчетов по отработанным методикам, предназначенным для расчета определенных деталей машин, приводит к тому, что *получаемые значения ресурсов становятся несопоставимыми*. Неизбежна проблема согласования степеней тяжести их нагрузочных режимов. Различные подходы в методиках к выбору нагрузочных режимов и характеристик несущей способности иллюстрирует таблица, которая построена по данным, взятым из работы [16].

3. Надежность несопряженных деталей принята в [32] *независимой от надежности других элементов*. Также принята независимость различных разрушительных процессов, происходящих в одних и тех же элементах, например, в зубчатых колесах. При расчете ВБР деталей (зубчатых колес), имеющих несколько видов отказов (предельных состояний), используется предположение о независимости отказов и перемножение ВБР. Тем самым не учитывается основной фактор — согласованное протекание разрушительных процессов в конструктивных элементах одной детали и в деталях каждого конкретного агрегата, что обусловлено общим фактором — нагрузочным режимом на входе в агрегат.

В рассматриваемом случае элементами ведущего моста, обладающими согласованными нагрузочными режимами, являются зубчатые колеса и подшипники. Причем в зубчатых колесах необходимо рассматривать и обеспечивать согласование процессов накопления повреждений в расчетах зубьев на усталость при изгибе и на контактную усталость — это основные разрушительные процессы для зубчатых. В условиях эксплуатации с более высокими уровнями входного крутящего момента все зубчатые колеса и подшипники будут иметь соответственно более низкие ресурсы, и наоборот.

4. При расчете показателей надежности в [32] использован метод Монте-Карло. Но применение этого метода, само по себе, не гарантирует построения корректной процедуры расчета сборочной единицы. Схема расчета включает два этапа: получение данных об отказах элементов, а затем переход от них к ресурсу агрегата. Тем самым *разрываются связи между ресурсами* элементов, которые

могут быть определены с учетом согласования их нагрузочных режимов в каждом цикле вычисления. Соответственно *разрываются связи между механическими процессами и процедурами расчета надежности*, что заведомо приводит к независимости ресурсов элементов сборочной единицы.

5. Из описания методики статистического моделирования в [32] неясно, как используется обобщенный нагрузочный режим: принимается ли он одним и тем же во всех испытаниях, либо в каждом цикле из него выбирается одно значение нагрузки для расчета зубчатых колес и подшипников и второе для расчета валов. Оба эти варианта использования обобщенного нагрузочного режима не соответствуют реальности, поэтому некорректны. В общем случае применение обобщенного нагрузочного режима при статистическом моделировании лишено смысла, поскольку *обобщенные данные не допускают варьирование*, присущее статистическому моделированию.

6. Дополнительные проблемы при применении методики [32] возникают, когда рассчитываются сборочные единицы типа коробок передач, для которых важным фактором является *установление относительных пробегов на передачах, которые существенно зависят от условий эксплуатации*. Применение обобщенных данных вместо учета их вариации ведет к существенным ошибкам в расчетах.

Из проведенного анализа следует, что *существующие подходы имеют ограниченные возможности* при решении задачи расчета реальной надежности машин и их сборочных единиц. Такая задача ставится и корректно решается (без приведенных выше методических погрешностей) в рамках надежности тематики РММ. Расчет надежности технических сложных изделий с позиций РММ требует отдельного рассмотрения.

Заключение. К основным мировым трендам относится усиление связи научных исследований с инновациями.

Разработка нормативных документов на основе научных знаний о процессах и объектах — необходимое звено в обеспечении качества и конкурентоспособности ТСИ. Чем обширнее фонд стандартов,

Таблица — Сочетание вероятностей, характеризующих степень тяжести режима нагружения F_q и разрушения F_R рассчитываемых деталей и получаемой ВБР при расчетных характеристиках нагруженности q_r и несущей способности σ_r

Рассчитываемые детали	Рекомендуемая (принимаемая) степень тяжести нагрузочного режима $F_q = F(q < q_r)$	Вероятность неразрушения, принимаемая при выборе характеристик несущей способности $F_R = F(\sigma_r = F(\sigma < \sigma_r))$	Вероятность безотказной работы [16]
Зубчатые колеса	0,84 [33]	0,10 [33]	0,95
Подшипники	0,50 [34]	0,10 [34]	0,94–0,87
Валы	0,50 [24]	0,50 [24]	0,50

тем выше диффузионный эффект технологического знания и тем динамичнее экономический рост.

Вклад стандартов в ВВП по различным оценкам составляет от 0,2 % (Канада) до 0,8 % (Германия).

Действующие в стране стандарты, патенты и лицензии становятся значимыми факторами экономического роста, сопоставимыми с капиталом и трудом (числом занятых).

Надежность — одна из ключевых характеристик качества. Количество международных стандартов в области надежности существенно нарастает. Особенностью международных стандартов является трактовка «надежности» как «готовности», при этом «долговечность» исключается из основных свойств технических объектов. Это не применимо к ТСИ. Целесообразно дифференцировать подходы к оценке надежности машиностроительных и электротехнических объектов, отразить это в межгосударственных и международных стандартах.

Механика представляет научную основу для обеспечения функциональных свойств и надежности ТСИ. Вместе с тем прочностная механика и различные направления теории надежности развиваются изолированно, что не дает возможности корректно оценивать надежность ТСИ, выполнять сквозные расчеты их показателей, начиная со стадий моделирования разрушительных процессов в механических компонентах. Интеграция указанных дисциплин и расчет реальной надежности ТСИ возможен на основе ресурсной механики машин.

Рассмотрение расчета надежности ТСИ в рамках РММ и общие выводы планируется представить в заключительной части работы.

Список литературы

1. Альгин, В.Б. Технически сложные изделия: исследования, разработка, стандартизация, охрана прав. Ч. 1: Анализ проблемы / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 1(34). — С. 5–13.
2. Доклад о положении в области интеллектуальной собственности в мире за 2015 год: пресс-релиз [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2015/article_0015.html.
3. Рудый, К.В. Структурные экономические реформы: необходимость для Республики Беларусь и зарубежный опыт / К.В. Рудый // Белорусский экономический журнал. — 2015. — № 1. — С. 30–41.
4. Рекомендации DIN по участию бизнеса в работах по стандартизации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://webportalsrv.gost.ru/portal/DOR-www.nsf/all/41A5C252D5A2F66BC3257E4300303A82?OpenDocument>. — Дата доступа: 21.02.16.
5. Германия. Немецкая стратегия стандартизации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rgtr.ru/international_cooperation/experience/germany/. — Дата доступа: 21.02.16.
6. Блинд, К. Общеэкономическая эффективность стандартизации. Актуализация исследования DIN, проведенного в 2000 году / К. Блинд, А. Юнгмиттаг, А. Мангельсдорф [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rgtr.ru/international_cooperation/experience/germany/. — Дата доступа: 21.02.16.
7. О качестве технически сложных товаров: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 16 июня 2014 г., № 578 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — Режим доступа: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=C21400578&p1=1>.

8. Техника сельскохозяйственная. Показатели надежности: СТБ 1616-2011. — Минск: Госстандарт, 2011. — 14 с.
9. О безопасности машин и оборудования: ТР ТС 010/2011: утв. Решением Комиссии Таможенного союза 18 окт. 2011 г. № 823. — Введ. 15.02.13. — Режим доступа: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/techreg/deptexreg/tr/Documents/P_823_1.pdf.
10. Безопасность машин и оборудования. Оценка риска: ГОСТ Р 54124-2010. — М.: Стандартиформ, 2013. — 96 с.
11. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения: ГОСТ Р 27.001-2009. — Введ.: 15.12.2009. — М.: Стандартиформ, 2010. — Режим доступа: <http://meganorm.ru/Data2/1/4293820/4293820223.pdf>.
12. Разработка и постановка продукции на производство. Термины и определения: СТБ 1218-2000. — Режим доступа: http://gost-snip.su/document/stb_1218_2000_razrabotka_i_postanovka_produktsii_na_proizvodstvo_termi.
13. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. — Режим доступа: http://declight.ru/statii/gost27_002-89.pdf.
14. Multibody management — Part 1: Guidance for management and application: IEC 60300-1:2014. — Access mode: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60300-1%7Bed3.0%7Den.pdf. — Date of access: 28.12.2015.
15. Multibody system [Electronic resource]. — Mode of access: http://en.wikipedia.org/wiki/Multibody_system. — Date of access: 28.12.2015.
16. Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин. — Минск: Наука і тэхніка, 1995. — 256 с.
17. Algin, V. Kinematic and dynamic computation of vehicle transmission based on regular constructs / V. Algin, V. Ivanov // In Proc. 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18–21, 2007 / ed. by Jean-Pierre Merlet and Marc Dahan. — 6 p.
18. Algin, V. Application of Regular Rotational and Translational Constructs to Vehicle Dynamics Problems / V. Algin, V. Ivanov // In Proc. 7th European Conference on Structural Dynamics, Southampton, 7–9 July 2008 / ed. by Michael J. — Southampton, 2008. — 12 p.
19. Альгин, В.Б. Схематизация и расчет мобильной машины как многомассовой системы. Регулярные механические системы / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 1(18). — С. 6–16.
20. Альгин, В.Б. Схематизация и расчет мобильной машины как многомассовой системы. Динамика машинного агрегата / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 2(23). — С. 5–18.
21. Альгин, В.Б. Динамика многомассовых систем машин при изменении состояний фрикционных компонентов и направленных силовых потоков / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 4(29). — С. 21–32.
22. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
23. Algin, V. From Newton's Mechanics to Dynamics of Regular Mechanical Systems with Variable States and Power Flows / V. Algin // Proc. of The 14th IFToMM World Congress, Taipei, 25–30 Oct. 2015. — Mode of access: <http://elite.newhopetek.com.tw/IFToMM2015CD/PDF/OS12-005.pdf>. — Date of access: 22.10.2015.
24. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: рук-во и справ.пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович; под ред. С.В. Серенсена. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
25. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: справ. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.
26. Кудрявцев, В.Н. Детали машин: учеб. для вузов / В.Н. Кудрявцев. — Л.: Машиностроение, 1980. — 464 с.
27. Гетман, А.Ф. Предупреждение усталостных повреждений элементов технических объектов на основе системной концепции прочности / А.Ф. Гетман // Надежность и долговечность машин и сооружений: сб. тр. — Киев, 2014. — Вып. 38. — С. 6–15.
28. Надежность технических систем: справ. / под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
29. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. — Киев: Логос, 2002. — 486 с.
30. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
31. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
32. Лукинский, В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. — Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
33. Цитович, И.С. Трансмиссии автомобиля / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло. — Минск: Наука и техника, 1979. — 256 с.
34. Кинематика и долговечность подшипников качения машин и приборов / И.С. Цитович [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1977. — 176 с.

ALGIN Vladimir B., Dr. Techn. Sc., Professor

Deputy General Director in Science

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

Joint Institute of the Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 April 2016.

TECHNICALLY COMPLICATED ITEMS: RESEARCH, DEVELOPMENT, STANDARDIZATION, PROTECTION OF RIGHTS. PART 2. USE OF MODERN SCIENTIFIC KNOWLEDGE

An article continues the first part published in the previous issue. The first part includes a cause analysis of lowering competitiveness domestic machine-building production and the general scheme of creation innovative technically complicated items (TCI). The second part contains the quantitative data, which connect factors, specified in the name of the article, with economic growth at creation of innovations. Features of the mechanical items, distinguishing them from electrotechnical objects, are described. Durability is included into basic properties of the TCI. Electrotechnical items have availability as the basic property. These differences should be reflected in standardization scope. Two main directions of mechanics, such as dynamics and strength, are analyzed. Necessity for integration of both directions within the frame of Lifetime mechanics of machines (LMM) is shown. Approaches to reliability calculation of technical items in strength mechanics, the structural (mathematical) and physical (mechanical) reliability theories are considered. Their narrow means for calculation of complicated mechanical objects are demonstrated. Methodology and methods of reliability calculation of TCI based on LMM positions as well as the general conclusions will be present in a final part of work.

Keywords: technically complicated items, competitiveness, quality, standardization, scientific researches, mechanics, reliability, patent-and-information support

References

- Algin V.B. Tehnicheski slozhnye izdelija: issledovanija, razrabotka, standartizacija, ohrana prav [Technically complex products: research, development, standardization, protection of rights]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2016, no. 1(34), pp. 5–13.
- Doklad o polozhenii v oblasti intellektual'noj sobstvennosti v mire za 2015 g. Press-reliz [A report on intellectual property position in the world in 2015 Press release]. Available at: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2015/article_0015.html (accessed 25 February 2015).
- Rudj K.V. Strukturnye jekonomicheskie reformy: neobhidnost' dlja Respubliki Belarus' i zarubezhnyj opyt [Structural economic reform: the need for the Republic of Belarus and foreign experience]. *Belorusskij jekonomicheskij zhurnal* [Belarusian economic journal], 2015, no. 1, pp. 30–41.
- Rekomendacii DIN po uchastiju biznesa v rabotah po standartizacii [Recommendations DIN business participation in the standardization works]. Available at: <http://webportalsrv.gost.ru/portal/DOR-www.nsf/all/41A5C252D5A2F66BC3257E4300303A82?OpenDocument> (accessed 21 February 2016).
- Germanija. Nemeckaja strategija standartizacii [Germany. The German Standardization Strategy]. Available at: http://www.rgrt.ru/international_cooperation/experience/germany/ (accessed 21 February 2016).
- Blind K., Jungmittag A., Mangelsdorf A. Obshhejekonomicheskaja jeffektivnost' standartizacii. Aktualizacija issledovanija DIN, provedennogo v 2000 godu [Overall cost-effectiveness of standardization. Actualization DIN study, conducted in 2000]. Available at: http://www.rgrt.ru/international_cooperation/experience/germany/ (accessed 21 February 2016).
- O kachestve tehnichecki slozhnyh tovarov: postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 16 ijunja 2014 g., 578 [About the quality of technically sophisticated products: Resolution of the Council of Ministers of the Rep. Belarus, June 16, 2014, № 578]. Available at: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=C21400578&p1=1/> (accessed 21 February 2016).
- STB 1616–2011. Tehnika sel'skohozjajstvennaja. Pokazateli nadezhnosti [State Standart 1616–2011. Agricultural engineering. reliability indicators]. 2011. 14 p.
- TR TS 010/2011. O bezopasnosti mashin i oborudovanija: utv. Resheniem Komissii Tamozhennogo sojuza 18 okt. 2011 g. № 823 [Technical Regulations of the Customs Union 010/2011. On the safety of machinery and equipment dated October 11, 2011]. Available at: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/txenreg/deptexreg/tr/Documents/P_823_1.pdf.
- GOST R 54124–2010. *Bezopasnost' mashin i oborudovanija. Ocenka riska* [State Standard R 54124–2010. Safety of machinery and equipment. Risk assessment]. Moscow: Standartinform, 2013. 96 p.
- GOST R 27.001–2009. *Nadezhnost' v tehnike. Sistema upravlenija nadezhnost'ju. Osnovnye polozhenija* [State Standart R 27.001–2009. Industrial product dependability. Reliability Management System. Fundamentals]. Moscow, Standartinform, 2010. Available at: <http://meganorm.ru/Data2/1/4293820/4293820223.pdf>.
- STB 1218–2000. *Razrabotka i postanovka produkcii na proizvodstvo. Terminy i opredelenija* [State Standart 1218–2000. The development and launching of new products. Terms and definitions]. Available at: http://gost-snip.su/document/stb_1218_2000_razrabotka_i_postanovka_produktsii_na_proizvodstvo_termi.
- GOST 27.002–89. *Nadezhnost' v tehnike. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija* [State Standart 27.002–89. Industrial product dependability. Basic concepts. Terms and definitions]. Available at: http://declight.ru/statii/gost27_002-89.pdf.
- Dependability management. Guidance for management and application: IEC 60300–1: 2014. Available at: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60300-1%7Bed3.0%7Den.pdf (accessed 28 December 2015).
- Multibody system. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Multibody_system/ (accessed 28 December 2015).
- Algin V.B. *Dinamika, nadezhnost' i resursnoe proektirovanie transmissij mobil'nyh mashin* [Dynamics, reliability and resource designing transmissions of mobile machines]. Minsk, Navuka i tjehgka, 1995. 256 p.
- Algin V., Ivanov V. Kinematic and dynamic computation of vehicle transmission based on regular constructs. *Proc. 12th IFToMM World Congress*. France, 2007. 6 p.
- Algin V., Ivanov V. Application of Regular Rotational and Translational Constructs to Vehicle Dynamics Problems. *Proc. 7th European Conference on Structural Dynamics*. Southampton, 2008, Southampton. 12 p.
- Algin V.B. Shematizacija i raschet mobil'noj mashiny kak mnogomassovoj sistemy. Reguljarnye mehanicheskie sistemy [Schematization and estimation of mobile machines as multimass system. Regular mechanical systems]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2012, no. 1(18), pp. 6–16.
- Algin V.B. Shematizacija i raschet mobil'noj mashiny kak mnogomassovoj sistemy. Dinamika mashinnogo agregata [Schematization and estimation of mobile machines as multimass system. The dynamics of the machine asssembly]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2013, no. 2(23), pp. 5–18.
- Algin V.B. Dinamika mnogomassovyh sistem mashin pri izmenenii sostojanij frikcionnyh komponentov i napravlenij silovyh potokov [Dynamics of multibody machines systems during changing states of friction components and directions of power flows]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2014, no. 4(29), pp. 21–32.
- Algin V.B. *Raschet mobil'noj tehniki: kinematika, dinamika, resurs* [Calculation of mobile technology: kinematics, dynamics, resource]. Minsk, Belarus. navuka, 2014. 271 p.
- Algin V. From Newton's Mechanics to Dynamics of Regular Mechanical Systems with Variable States and Power Flows. *Proc. of The 14th IFToMM World Congress*. Taipei, 2015. Available at: <http://elite.newhopetek.com.tw/IFToMM2015CD/PDF/OS12-005.pdf/> (accessed 22 October 2015).
- Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. *Nesushhaja sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost'. Rukovodstvo i spravochnoe posobie* [Bearing capacity and calculation of machine parts for strength. Guide and Reference Manual]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 488 p.
- Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detalej mashin: spravochnik* [Calculation of strength of machine parts. Manual]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 640 p.
- Kudryavcev V.N. *Detali mashin: ucheb. dlja vuzov* [Machine parts: college textbook]. Leningrad, Mashinostroenie, 1980. 464 p.
- Getman A.F. Preduprezhdenie ustalostnyh povrezhdenij jelementov tehnicheckih objektov na osnove sistemnoj koncepcii prochnosti [Fatigue damage preventing of elements of technical objects on the basis of systemic concentrations concept of strength]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzhenij* [Reliability and durability of machines and constructions], 2014, no. 38, pp. 6–15.
- Ushakov I.A. *Nadezhnost' tehnicheckih sistem: spravochnik* [Reliability of technical systems: a handbook]. Moscow, Radio i svjaz', 1985. 608 p.
- Strelnikov V.P., Feduhin A.V. Ocenka i prognozirovanie nadezhnosti jelektronnyh jelementov i sistem [Estimation and forecasting of the reliability of electronic components and systems]. Kiev, Logos, 2002. 486 p.
- Pronikov A.S. *Nadezhnost' mashin* [Reliability of machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 592 p.
- Bolotin V.V. *Resurs mashin i konstrukcij* [Resource of machines and constructions]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 448 p.
- Lukinskiy V.S., Zajcev E.I. *Prognozirovanie nadezhnosti avtomobilej* [Forecasting of cars reliability]. Leningrad, Politehnika, 1991. 224 p.
- Citovich I.S., Kanonik I.V., Vavulo V.A. *Transmissii avtomobilja* [Vehicle Transmissions]. Minsk, Nauka i tehnika, 1979. 256 p.
- Citovich I.S. [et al.]. *Kinematika i dolgovechnost' podshipnikov kachenija mashin i priborov* [Kinematics and durability of rolling bearing machines and instruments]. Minsk, Nauka i tehnika, 1977. 176 p.