

УДК 621-192

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук, проф.
заместитель генерального директора по научной работе¹
E-mail: vladimir.algin@gmail.com

Н.Н. ИШИН, д-р техн. наук, доц.
директор НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: nik_ishin@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 06.07.2017.

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ В ОБЪЕДИНЕННОМ ИНСТИТУТЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ НАН БЕЛАРУСИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ. ЧАСТЬ 1. СТАНОВЛЕНИЕ

Основателем отечественной научной школы надежности технически сложных изделий (ТСИ) является член-корреспондент АН БССР Цитович Игорь Сергеевич, директор Института проблем надежности и долговечности машин, предшественника Объединенного института машиностроения, в 1973–1978 годах. В этот период институт получил признание как ведущая в СССР научная организация в области надежности машин. Последующие руководители института также уделяли большое внимание работам в области надежности машин, полагая их приоритетными. При руководстве институтом членом-корреспондентом Берестневым О.В. (период 1978–2002 годы) усилиями в основном сотрудников института разработан первый в СССР государственный стандарт «Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования: ГОСТ27.301-83» и заменившие этот стандарт «Методические указания. Надежность в технике. Расчет показателей надежности. Общие положения: РД 50-639-87», подготовлен ряд докторских диссертаций по тематике «динамика и надежность машин» (Островерхов Н.Л., Ксендзов В.Н., Альгин В.Б., Бойко Л.И.). При нынешнем руководстве (генеральный директор Поддубко С.Н.) по инициативе Объединенного института машиностроения НАН Беларуси в 2015 году создан приказом Госстандарта Республики Беларусь национальный технический комитет «Надежность в технике» (ТК ВУ33), действующий при институте. В настоящее время одним из закрепленных за институтом приоритетов в области фундаментальных и прикладных исследований является надежность машин как технически сложных изделий. Основные полученные результаты в этой области по направлению расчета надежности и расхода ресурса представлены в монографии «Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс» (автор доктор технических наук Альгин В.Б., Минск: Беларус. навука, 2014), а по направлению диагностики и мониторинга надежности ТСИ в эксплуатации — в монографии «Динамика и вибромониторинг зубчатых передач» (автор доктор технических наук Ишин Н.Н., Минск: Беларус. навука, 2013). Эти результаты вошли в разработанные совместно институтом и ТК ВУ33 государственные стандарты СТБ 2465-2016 «Надежность в технике. Менеджмент надежности технически сложных изделий» и СТБ 2466-2016 «Надежность в технике. Расчет надежности технически сложных изделий». В статье рассматриваются основные этапы развития школы и полученные фундаментальные и прикладные результаты, которые охватывают вопросы понимания сущности надежности ТСИ, оценки и обеспечения их надежности на стадии проектирования, расхода ресурса, а также мониторинга и диагностики надежности в процессе эксплуатации ТСИ. Одним из инструментов доведения до широкого практического использования результатов школы является ТК ВУ33, в состав которого на сегодняшний день входит 12 ведущих отечественных предприятий (организаций) в области теории и практики надежности технических изделий.

Ключевые слова: технически сложное изделие, надежность, расчет, диагностика и мониторинг в эксплуатации, белорусская школа

Введение. Конкурентоспособность отечественной техники во многом связана с работами отечественных исследователей, наличием отечественных научных школ, одна из которых в области надежности ТСИ представлена в настоящей статье.

Традиционная (структурная) теория надежности — математическая дисциплина, у которой нет связей с механикой, оперирующей силами, напряжениями, коэффициентами запаса. Однако в последнее время все шире в различных облас-

тях 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 названиями «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 электротехнические системы ([1, 2] и другие).

Физическое (механическое) направление в теории надежности. Это направление основывается на использовании физических моделей для описания процессов отказов отдельных элементов изделий. Применительно к машинам заголовки публикаций обычно содержат сочетание «надежность (ресурс) машин» [3, 4] и др.

В области расчета надежности автотракторной техники следует отметить наиболее продвинутую по рассматриваемой тематике работу [49]. В ней используются некоторые элементы расчета деталей трансмиссии по предельным состояниям, разработанные белорусской школой, однако в целом имеются принципиальные методические расхождения на уровне подходов. Недостатки метода расчета [5] состоят в следующем:

- в расчете используется «*обобщенный* нагрузочный режим редуктора в виде распределений ординат и амплитуд крутящего момента на полуоси и средней интенсивности нагружения» [5];
- проведение расчетов по отработанным методикам, предназначенным для расчета определенных деталей машин, основанных на различных подходах к выбору их расчетных режимов, приводит к тому, что *получаемые значения ресурсов становятся несопоставимыми*;
- надежность несопряженных деталей принята в [5] *независимой от надежности других элементов*. Также принята независимость различных разрушительных процессов, происходящих в одних и тех же элементах, например в зубчатых колесах. При расчете вероятности безотказной работы деталей (зубчатых колес), имеющих несколько предельных состояний, используется перемножение вероятностей в предположении независимости отказов. Тем самым, не учитывается основной фактор — согласованное протекание разрушительных процессов в конструктивных элементах

одной детали и элементов в каждом конкретном агрегате, что обусловлено общим фактором — нагрузочным режимом на входе в агрегат;

- из описания использованной процедуры статистического моделирования в [5] 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 в [5] обобщенного нагрузочного режима лишено смысла, поскольку обобщенные данные не допускают варьирование, присущее статистическому моделированию;

- дополнительные проблемы при применении подхода [5] 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.

Более подробный анализ характерных направлений в теории надежности представлен в работах [6], [7].

Источники белорусской школы надежности. Источниками научной школы и рассматриваемого направления являются работы по оценке нагруженности трансмиссий мобильных машин и вероятностные расчеты их деталей, начатые под руководством Цитовича И.С. в Белорусском политехническом институте и продолженные в Институте проблем надежности и долговечности машин (ИНДМАШ) АН БССР.

Трансмиссия — типичный представитель технически сложных изделий. Поэтому результаты, полученные при ее исследованиях, оказались достаточно универсальными, методически применимыми для широкого класса объектов. Основные результаты этих исследований, по тематике, имеющей непосредственное отношение к теории надежности, состоят в следующем:

- условия эксплуатации мобильных машин и действия водителя существенно изменяются от машины к машине, что приводит к вариации показателей нагруженности трансмиссии и дополнительному рассеянию ресурсов ее компонентов. Принципиальным является положение о том, что для построения вероятностного расчета необходимо учитывать *вариацию переменных нагрузочных режимов* [8];
- выходя из строя трансмиссии возможен, во-первых, в результате накопления ее деталями повреждений (для деталей трансмиссии основными видами являются усталостные повреждения), во-вторых,

в результате действия максимальных динамических нагрузок. Поэтому необходимо предусматривать два вида расчетов трансмиссии: «на долговечность» и на «прочность». В обоих видах расчетов ключевыми вопросами являются выбор (обоснование) расчетных случаев прежде всего с точки зрения нагрузочных режимов.

Определение нагрузочных режимов для расчетов долговечности трансмиссий. Проведены многочисленные эксперименты, обобщены экспериментальные данные по нагрузочным режимам, получены характерные распределения нагрузок на полуосях автомобилей. Для описания закономерностей нагружения использованы удельные тяговые усилия (удельные тяги). (Удельное тяговое усилие = полное тяговое усилие/полный вес машины). Характерный пример представлен на рисунке 1 а [9]. Построены типовые кривые удельных тяг мобильных машин различных классов (см. рисунок 1 б) [9].

Установлено, что в пределах выделенных классов автомобилей можно использовать единые кривые удельных тяг, а в расчетах на долговечность переходить от них к низкочастотным нагрузкам на конкретных деталях автомобиля (зубчатых колесах, подшипниках). Динамические составляющие нагрузок учитываются в расчетах деталей коэффициентами внутренних и внешних динамических нагрузок, например от окружной скорости зубчатого колеса и типа трансмиссии. В результате выделен набор параметров, по которым рекомендуется вести расчет нагрузочного режима общетранспортного автомобиля и его трансмиссии [10].

Вариация нагрузочных режимов и коэффициенты пробега. В работе [11] предложено степень тяжести отдельного нагрузочного режима характеризовать средним значением удельного тягового усилия автомобиля. Распределение этого параметра может быть использовано для описания разнообразия нагрузочных режимов.

Дальнейшее развитие работ по данному направлению — это введение коэффициентов пробега [12]. В расчетах кривая распределения нагрузок заменяется расчетной нагрузкой и коэффициентом пробега. Последний служит для описания повреждающего действие спектра нагрузок данной кривой. Его использование существенно упрощает расчеты. Построены графики для выбора значений коэффициентов пробега на передачах трансмиссии в зависимости от соотношения расчетной и средней нагрузок кривой распределения и типа автомобиля для различных предельных состояний деталей, характеризующихся показателем наклона кривой усталости m (рисунок 2).

Подробно деятельность и результаты, полученные под руководством Цитовича И.С. на этапе его работы в Белорусском политехническом институте, а затем в ИНДМАШ АН БССР, освещены в статьях [13], [14].

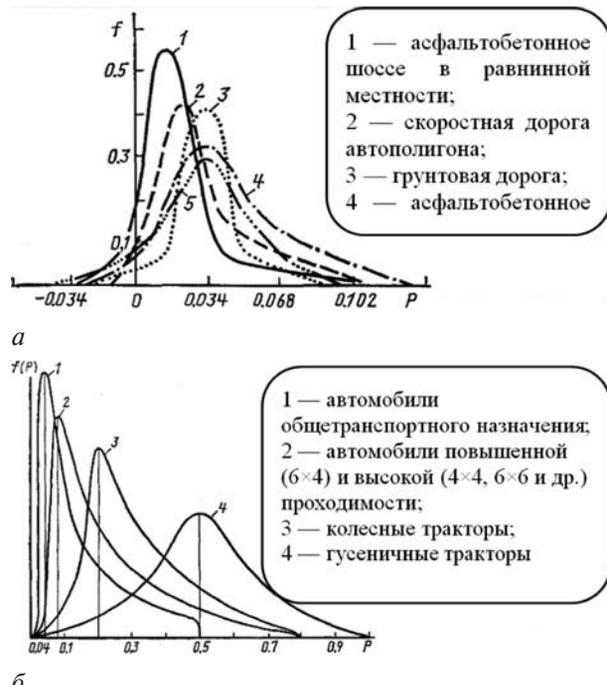


Рисунок 1 — Кривые распределения плотностей вероятности удельных тяговых усилий: автомобиля массой 33 т в различных условиях эксплуатации (а) и общие кривые различных типов мобильных машин (б) [9]

Становление. Становление научной школы связано с работой Цитовича И.С. в ИНДМАШ АН БССР (ныне Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси), который он возглавил в 1973 году. Были выполнены важные для республики разработки, установлены тесные связи с ведущими предприятиями автомобильной, тракторной, станкостроительной и сельскохозяйственной отраслей промышленности. Большое внимание уделено диагностике надежности машин в эксплуатации, разработке методов испытаний и стендового оборудования, исследованиям и разработке путей повышения надежности автомобилей, тракторов, металлообрабатывающих станков. Рекомендации по результатам исследований института широко внедрены на ведущих предприятиях республики и СССР. В результате ресурс отечественной автотракторной техники повысился в 1,5–2 и более раз. Только за 1971–1978 годы от первичного внедрения разработок института народным хозяйством страны получен экономический эффект более 10 млн руб. [15].

Разработанные вероятностные расчеты деталей автомобилей и тракторов внедрены в расчетную практику, получили признание в СССР и за рубежом, вошли в учебные курсы подготовки специалистов по автотракторным специальностям, в том числе в БНТУ, МВТУ им. Н.Э. Баумана и др. Были созданы основополагающие нормативные документы в области «Надежность в технике»

Разработки внесли крупный вклад в развитие науки о надежности. ИНДМАШ долгое время

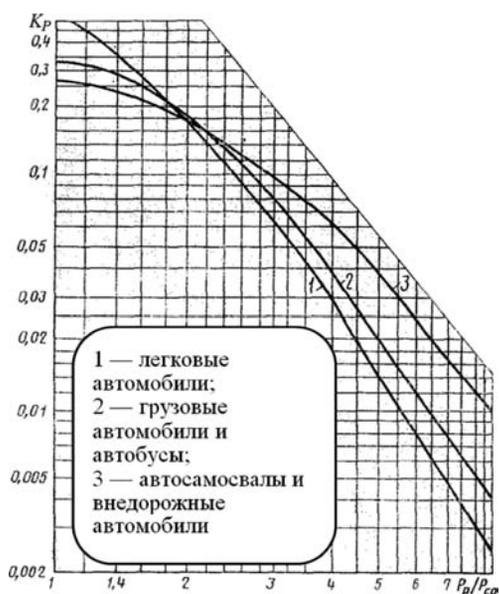


Рисунок 2 — Графики для определения коэффициентов пробега при расчете деталей по контактным напряжениям ($m = 3$) [12]

оставался первым и единственным институтом подобного профиля в СССР. Как известный центр надежности ИНДМАШ стал своеобразным брендом, широко известным не только в СССР, но и далеко за его пределами.

К принципиальным его разработкам следует отнести первый стандарт в СССР по прогнозированию надежности ГОСТ 27.301-83 «Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования» [16]. Важно отметить, что ГОСТы и другие нормативные документы в СССР были обязательными для применения, в отличие от ситуации, сложившейся в настоящее время, когда использование ГОСТов, СТБ носят не обязательный, а рекомендательный характер. Это обстоятельство дополнительно подчеркивает признание белорусской школы надежности машин на всем пространстве СССР и придает особое значение первым нормативным документам, разработанным на основе положений и методик белорусской школы.

ГОСТ 27.301-83 внесен Академией наук Белорусской ССР; исполнители от ИНДМАШ: Цитович И.С., Берестнев О.В., Альгин В.Б., Ксендзов В.Н., Кузьмич К.К., Павловский В.Я., Передкова Г.И., Шевченко В.С.

ГОСТ устанавливает принципы, правила и порядок прогнозирования надежности изделий машиностроения при проектировании, регламентирует методы и требования к прогнозированию показателей надежности изделий на стадиях их разработки.

Прогнозирование надежности определяется как «предсказание в значении вероятностного суждения на определенный период эксплуатации показателей надежности проектируемых изделий на базе информации, известной из проектной документации, материалов испытаний макетов

и опытных образцов, а также из опытно-статистических данных об изделиях-аналогах, если такие имеются».

Прогнозирование надежности расчетным методом проводится с использованием иерархической структурной схемы. Рассматривают все элементы, начиная с верхнего уровня структурной схемы и заканчивая нижним, и подразделяют их на группы: 1) элементы, показатели надежности которых следует определять расчетными методами; 2) элементы с заданными показателями надежности, включая назначенные параметры потока отказов; 3) элементы, показатели надежности которых следует определять опытно-статистическими методами или методами испытаний.

Экспертные методы прогнозирования показателей надежности рекомендуется применять при невозможности или нецелесообразности по конкретным условиям использовать расчетные методы при недостаточном количестве информации, допустимости приближенной оценки, для неотвественных деталей и сборочных единиц.

В общем случае прогнозируют показатели безотказности и показатели долговечности. Для отдельных видов изделий прогнозируют показатели ремонтпригодности и показатели сохраняемости.

Для элементов, надежность которых определяют расчетными методами, определяют спектры нагрузок и другие особенности эксплуатации; составляют модели физических процессов, приводящих к отказам, и устанавливают критерии отказов и предельных состояний (разрушение от длительных нагрузок, от кратковременных перегрузок, потеря упругости, наступление предельного износа и др.); классифицируют их на группы по критериям отказов и выбирают для каждой группы соответствующие методы расчета.

Прогнозирование надежности изделия осуществляют в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 3.

Производят расчеты по предельным состояниям по детерминированным моделям, а затем на основании вероятностных зависимостей устанавливают законы распределения отказов и определяют показатели надежности элементов. Принимают, что сборочная единица или изделие выходят из строя, если отказывает хотя бы одна деталь из совокупности n деталей.

Таким образом, ГОСТ 27.301-83 [16] закрепил в научно-техническом сообществе основные принципы прогнозирования надежности технических изделий, главной особенностью которых является использование физических моделей повреждений механических элементов под действием нагрузок. Этим данный подход принципиально отличается от подходов к расчету, например электротехнических изделий, в которых показатели надежности элементов задаются в качестве исходных данных.

Методы расчета надежности получили дальнейшее развитие в Методических указаниях по расчету машиностроительных компонентов РД 50-639-87 [17]. Исполнители от ИНДМАШ: Берестнев О.В., Капанец Э.Ф., Альгин В.Б., Ксендзов В.Н., Павловский В.Я., Передкова Г.Н. Методические указания были разработаны и приняты взамен следующих нормативных документов: ГОСТ 19460-74 «Надежность в технике. Расчет показателей безопасности невосстанавливаемых объектов» (без резервирования); ГОСТ 20237-74 «Надежность в технике. Расчет показателей безотказности восстанавливаемых объектов» (без резервирования); ГОСТ 20738-75 «Надежность в технике. Расчет комплексных показателей надежности восстанавливаемых объектов» (без резервирования) и ГОСТ 27.301-83.

Вводная часть, разделы 1 и 2 содержат ссылки на ГОСТ 27.301-83. В Методические указания включены приложения: Рекомендации по выбору вида функции распределения при проведении ориентировочных расчетов, Основные модели оценки надежности с учетом предельных состояний, Расчет показателей надежности редуктора и его составных частей по моделям физических процессов разрушения.

Последнее приложение содержит пример расчета редуктора как системы с учетом зависимостей между мерами повреждения его лимитирующих элементов.



Рисунок 3 — Порядок прогнозирования надежности изделий при проектировании

тирующих элементов. Такой расчет был представлен впервые. До этого был известен расчет системы из одинаковых элементов (типа цепи) [18]. Его особенностью представленного расчета является рассмотрение системы с различными элементами, у которых меры нагружения (нагрузочные режимы) однозначно связаны.

Редуктор планетарного типа описан как невосстанавливаемый объект, у которого лимитирующими надежностью являются следующие составные части (рисунок 4) подшипник сателлита, солнечное колесо, сателлит. Требуется рассчитать следующие показатели надежности редуктора: средний и гамма-процентные ресурсы ($\gamma = 50, 80, 90 \%$), вероятности безотказной работы для заданных значений наработки $t = 1000, 3500, 6000$ ч, при этом учесть предельные состояния составных частей редуктора.

К возможным предельным состояниям составных частей планетарного редуктора относят: контактную усталость подшипника сателлита a ; контактную усталость зубьев солнечного колеса b контактную усталость зубьев сателлита c ; усталость при изгибе зубьев сателлита d . Схему надежности представляют в виде цепи четырех последовательно соединенных элементов a, b, c, d .

Результаты расчета в описанной постановке задачи представлены на рисунке 4. Составные части редуктора имеют существенно отличные вероятностные характеристики, что не позволяет рассматривать его как известную систему типа цепи. При этом задача не сводится к перемножению вероятностей безотказной работы элементов, как в случае представления редуктора системой независимых элементов.

Подробное описание данного расчета приведено в [19]. Финальная часть расчета, в которой реализуется связь мер повреждения различно нагруженных элементов, представлена также в [20].

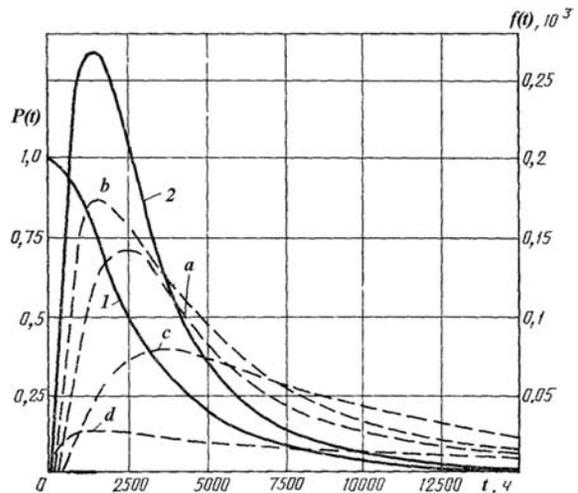


Рисунок 4 — Планетарный редуктор и результаты расчета его надежности: 1 — интегральная функция вероятности безотказной работы; 2 — плотность вероятности наработки редуктора до отказа; a, b, c, d — плотности вероятности наработки до отказа лимитирующих элементов

Заключение. Этап становления белорусской школы надежности технически сложных изделий завершился созданием основных принципов и методик расчета машиностроительных изделий и отражением их в нормативных документах СССР, что качественным образом (на уровне подходов) изменило методическую основу их расчета. На смену доминировавшим в тот период в механике методам расчета по коэффициентам запаса и допускаемым напряжениям был разработан и получил признание расчет, целью которого является построение кривой распределения наработок машиностроительных компонентов по различным предельным состояниям. Выполнен большой объем экспериментальных исследований нагруженности различных машин, установлены вероятностные закономерности их нагрузочных режимов. Это позволило довести до практического применения расчеты трансмиссионных и других компонентов, в которых воспроизводится вариация нагрузочных режимов, которая особенно характерна для мобильных машин. Такой подход создал предпосылки перехода к расчету надежности узлов и агрегатов машин, как систем с различными нагруженными элементами.

Список литературы

1. Надежность технических систем: справочник / под ред. И.А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
2. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. — К.: Логос, 2002. — 486 с.
3. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
4. Бологин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Бологин. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
5. Лукинский, В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. — Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
6. Альгин, В.Б. Технически сложные изделия: исследования, разработка, стандартизация, охрана прав. Часть 2. Использование современных научных знаний / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 2(35). — С. 5–14.
7. Альгин, В.Б. Технически сложные изделия: исследования, разработка, стандартизация, охрана прав. Часть 3. Научное и организационное обеспечение инноваций / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 3(36). — С. 5–14.
8. Цитович, И.С. Прогнозы, поиски и результаты исследований проблемной лаборатории автомобилей // Сборник статей, посвященный 50-летию БПИ. — Минск: БПИ, 1975. — С. 65–76.
9. Цитович, И.С. Надежность трансмиссий автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, Б.Е. Митин, В.А. Дзюнь. — Минск: Наука и техника, 1985. — 143 с.
10. Цитович, И.С. Расчеты по предельным состояниям валов, шестерен и подшипников автомобиля / И.С. Цитович. — Минск: БПИ, 1960. — 122 с.
11. Ровдо, В.И. Статистические методы исследования нагрузок транспортных и тяговых машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Ровдо. — Минск: БПИ, 1973.
12. Цитович, И.С. Трансмиссии автомобиля / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло. — Минск: Наука и техника, 1979. — 256 с.
13. Альгин, В.Б. К 100-летию И.С. Цитовича. Белорусская школа расчета и проектирования трансмиссий. Ч. 1: Начальный период / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 4(37). — С. 5–18.
14. Альгин, В.Б. Игорь Сергеевич Цитович. Деятельность и научное наследие (к 100-летию со дня рождения) / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2(39). — С. 95–104.
15. Цитович, И.С. Пути повышения надежности машин / И.С. Цитович, О.В. Берестнев. — Минск: Наука и техника, 1979. — 88 с.
16. Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования: ГОСТ 27.301-83 / Гос. ком. СССР по стандартам. — Введ. 28.02.83. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 42 с.
17. Методические указания. Надежность в технике. Расчет показателей надежности. Общие положения: РД 50-639-87 / Гос. ком. СССР по стандартам. — Введ. с 01.07.88. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 51 с.
18. Капур, К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон; пер. с англ. — Мир, 1980. — 604 с.
19. Цитович, И.С. Анализ и синтез планетарных коробок передач автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, В.Б. Альгин, В.В. Грицкевич. — Минск: Наука и техника, 1987. — 224 с.

ALGIN Vladimir B., D. Sc. in Eng., Prof.

Deputy General Director in Science¹

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

ISHIN Nikolay N., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Director of R&D Center "Mining Machinery"¹

E-mail: nik_ishin@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 06 July 2017.

FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC SCHOOL OF RELIABILITY OF TECHNICALLY COMPLICATED ITEMS AT THE JOINT INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERING OF NAS OF BELARUS. PART 1. FORMATION

The founder of the national scientific school of reliability of technically complicated items is a Corresponding Member of the Academy of Sciences of the BSSR Igor Tsitovich (Director of the Institute of Reliability and Durability of Machines, predecessor of the Joint Institute of Mechanical Engineering, 1973–1978). During this period the Institute

was recognized as the leading scientific organization in the field of machine reliability in the USSR. The next heads of the Institute also paid much attention to work in the field of machine reliability, considering it to be the priority. Under the Institute leadership by a Corresponding Member Berestnev O.V. (1978–2002), the first in the USSR state standard “Reliability in technique. Prognosis of products reliability during design. General requirements: GOST 27.301–83” were developed as well as replacing this standard “Methodological guidelines. Reliability in technique. Calculation of reliability indexes. General provisions: RD 50–639–87”. D. Sc. dissertations on the subject “dynamics and reliability of machines” were prepared by Ostroverkhov N.L., Ksendzov V.N., Algin V.B., Boyko L.I. Under the current leadership (General Director Poddubko S.N.), by the initiative of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus in 2015, the National Technical Committee “Dependability in technics” (TC BY33), acting at the Institute, was established by the State Standard Committee. Currently, one of the priorities assigned to the Institute in the field of fundamental and applied research is reliability of machines as technically complicated items. The main results obtained in this field in the direction of calculating the reliability and lifetime expense are presented in the monograph “Calculation of mobile machines: kinematics, dynamics, lifetime” (author: V.B. Algin, D. Sc. in Eng., Minsk, Belaruskaya navuka, 2014), and in the direction of diagnostics and monitoring of the reliability of the technically complex products in operation — in the monograph “Dynamics and Vibration Monitoring of Gears” (author: N.N. Ishin, D. Sc. in Eng., Minsk, Belaruskaya navuka, 2013). These results were included in the state standards (STB 2465–2016 “Dependability in technics. Dependability management of technically complicated items” and STB 2466–2016 “Dependability in technics. Dependability calculation of technically complicated items”) developed jointly by the Institute and the TC BY33. The paper shows the main stages of the development of the National Dependability School as well as the fundamental and applied results obtained that cover the issues of understanding the subject matter of technically complicated items reliability, assessing and ensuring their reliability at the design stage, lifetime expense, and monitoring and reliability diagnostics in operation of technically complicated items. One of the tools for coupling the results of the National Dependability School to the wide practical use is the TC BY33, which currently includes 12 leading domestic enterprises (organizations) in the theory and practice of reliability of technical items.

Keywords: technically complicated item, reliability, calculation, diagnostics and monitoring in operation, Belarusian school

References

- Ushakov I.A. *Nadezhnost tehnikeskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Moscow, Radio i svjaz, 1985. 608 p.
- Strelnikov V.P., Feduhin A.V. *Ocenka i prognozirovanie nadezhnosti jelektronnyh jelementov i sistem* [Estimation and prediction 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* [Lifetime of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 448 p.
- Lukinskiy V.S., Zaitsev E.I. *Prognozirovanie nadezhnosti avtomobilej* [Forecasting the reliability of cars]. Leningrad, Politehnika, 1991. 224 p.
- Algin V.B. Tehnicheski slozhnye izdelija: issledovaniya, razrabotka, standartizacija, ohrana prav. Chast 2. Ispolzovanie sovremennyh nauchnyh znaniy [Technically complicated items: research, development, standardization, protection of rights. Part 2. Using modern scientific knowledge]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 2(35), pp. 5–14.
- Algin V.B. Tehnicheski slozhnye izdelija: issledovaniya, razrabotka, standartizacija, ohrana prav. Chast 3. Nauchnoe i organizacionnoe obespechenie innovacij [Technically complicated items: research, development, standardization, protection of rights. Part 3. Scientific and organizational support of innovations]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 3(36), pp. 5–14.
- Tsitovich I.S. Prognozy, poiski i rezultaty issledovaniy problemnoj laboratorii avtomobilej [Forecasts, searches and results of researches of the problem laboratory of automotive vehicles]. *Sbornik statej, posvjashhennyj 50-letiju BPI* [Collection of articles devoted to the 50th anniversary of BPI], Minsk, BPI, 1975, pp. 65–76.
- Tsitovich I.S., Mitin B.E., Dzyun V.A. *Nadezhnost transmissij avtomobilej i traktorov* [Reliability of transmissions of automobiles and tractors]. Minsk, Nauka i tehnika, 1985. 143 p.
- Tsitovich I.S. *Raschetny po predelnym sostojanijam valov, shesteren i podshpnikov avtomobilja* [Calculations on the limiting states of shafts, gears and bearings of the car]. Minsk, BPI, 1960. 122 p.
- Rovdo V.I. *Statisticheskie metody issledovaniya nagruzok transportnyh i tjagovyh mashin. Diss. kand. tehn. nauk* [Statistical methods of research of loads of transport and traction machines. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Minsk, BPI, 1973.
- Tsitovich I.S., Kanonik I.V., Vavulo V.A. *Transmissii avtomobilja* [Automobile transmission]. Minsk, Nauka i tehnika, 1979. 256 p.
- Algin V.B. K 100-letiju I.S. Citovicha. Belorusskaja shkola rascheta i proektirovaniya transmissij. Ch. 1: Nachalnyj period [To the 100th anniversary of I.S. Tsitovich. Belarusian school of calculation and design of transmissions. Part 1: The initial period]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 4(37), pp. 5–18.
- Algin V.B. Igor Sergeevich Citovich. Dejatelnost i nauchnoe nasledie (k 100-letiju so dnja rozhdenija) [Igor Sergeevich Tsitovich. Activities and scientific heritage (on the occasion of the 100th anniversary of his birth)]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], no. 2(39), pp. 95–104.
- Tsitovich I.S., Berestnev O.V. *Puti povysheniya nadezhnosti mashin* [Ways to improve the reliability of machines]. Minsk, Nauka i tehnika, 1979. 88 p.
- GOST 27.301–83. *Nadezhnost v tehnike. Prognozirovanie nadezhnosti izdelij pri proektirovanii. Obshhie trebovaniya* [State Standard 27.301–83. Reliability in technique. Prognosis of products reliability during design]. Moscow, Izd-vo standartov, 1983. 42 p.
- Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost v tehnike. Raschet pokazatelej nadezhnosti. Obshhie polozhenija* [Methodological guidelines. Reliability in technique. Calculation of reliability indexes. General provisions]. Moscow, Izd-vo standartov, 1987. 51 p.
- Kapur K., Lamberson L. *Nadezhnost i proektirovanie sistem* [Reliability and System Design]. Moscow, Mir, 1980. 604 p.
- Tsitovich I.S., Algin V.B., Gritskевич V.V. *Analiz i sintez planetarnykh korobok peredach avtomobilej i traktorov* [Analysis and synthesis of planetary gearboxes for cars and tractors]. Minsk, Nauka i tehnika. 224 p.