

УДК 621-192

**В.Б. АЛЬГИН**, д-р техн. наукзаместитель генерального директора по научной работе<sup>1</sup>

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

**Н.Н. ИШИН**, д-р техн. наукдиректор научно-технического центра «Карьерная техника»<sup>1</sup>

E-mail: nik\_ishin@mail.ru

<sup>1</sup>Объединенный 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 2: РАЗВИТИЕ**

*Во второй части рассматриваются основные этапы развития школы и полученные фундаментальные и прикладные результаты, которые охватывают вопросы понимания сущности надежности технически сложных изделий (ТСИ), оценки и обеспечения их надежности на стадии проектирования, расхода ресурса, а также мониторинга и диагностики надежности в процессе эксплуатации ТСИ. Представлено междисциплинарное направление «Ресурсная механика машин», которое исследует с единых позиций проблемы оценки и обеспечения функциональных и ресурсных свойств машины и реализует этот подход в соответствующих принципах, моделях и методах. Рассмотрены новые направления развития школы, относящиеся к прогнозированию индивидуальной надежности изделий: управление надежностью на основе мониторинга режимов работы машины с использованием моделей расхода ресурса, методология вибрационно-импульсного диагностирования зубчатых передач, реализованная в бортовой системе вибромониторинга редуктора мотор-колеса карьерного самосвала.*

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

**Введение.** В Республике Беларусь в течение многих лет ведутся разработки и производство известных во всем мире отечественных технически сложных изделий, к которым согласно Указу Президента Республики Беларусь (от 27 марта 2008 г. № 186) относятся автотранспортные средства, тракторы, комбайны и другие сельскохозяйственные машины и оборудование, станки и иное основное технологическое (промышленное) оборудование.

Теория надежности — сравнительно молодая наука, возникшая в середине прошлого века с появлением сложных многоэлементных систем как ответ на проблемную ситуацию: почему техническая система, состоящая из многих надежных элементов, оказывается ненадежной? Ответ на это вопрос дает главная формула теории надежности в виде произведения вероятностей безотказной работы элементов. Из нее следует, что чем больше в системе элементов, тем она менее надежна. Однако практика опровергает данное положение: многие современные технические изделия гораздо сложнее прежних, и при этом более надежны. Объяснение этому для ТСИ можно получить толь-

ко в результате совместного рассмотрения положений механики, теории надежности, системного анализа, на чем основывается развиваемое в настоящее время в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси направление «ресурсная механика машин» (РММ).

В первой части описан этап становления белорусской школы надежности технически сложных изделий, который 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, особенно характерная для мобильных машин. Такой подход создал предпосылки для развития качественно нового подхода к оценке и обеспечению надежности узлов и агрегатов машин в процессе их жизненного цикла.

#### Развитие научной школы надежности ТСИ.

В настоящее время школа надежности ТСИ развивается в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Основные теоретические результаты получены и продолжают формироваться при проведении научных исследований в действующем и предшествующих циклах государственной программы научных исследований «Механика, металлургия и техническая диагностика в машиностроении», а также фундаментальных исследований по грантам Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, среди которых следует отметить работу «Фундаментальные исследования динамических процессов эксплуатационных воздействий, накопления повреждений и разрушений в объектах машиностроения, прогнозирование ресурса на стадии проектирования и оценка их надежности» — совместный проект Объединенного института машиностроения НАН Беларуси с Институтом машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, № 12–08–90026-Бел\_а (РФ)/Г12Р-004 (РБ), 2012–2014); исследования выполнены под научным руководством с российской стороны члена-корреспондента РАН Н.А. Махутова, с белорусской стороны — доктора технических наук, профессора В.Б. Альгина.

Принципиально новыми результатами стали разработанные методы расчета реальной надежности технически сложных изделий, состоящих из многих компонентов. Методы основаны на интеграции моделей механики, теории надежности, системного анализа и принципе зависящего поведения элементов в нагруженной механической системе. Данные методы развиваются в рамках интегрального (междисциплинарного) направления «ресурсная механика машин», которое рассматривает с единых позиций вопросы оценки и обеспечения функциональных (динамических) и ресурсных (прочностных, надежностных) свойств машины, не только полагая при этом, что процессы движения машины, нагружения и повреждения ее компонентов связаны, но и реализуя это положение в соответствующих принципах, моделях и методах.

На рисунке 1 показаны источники и направления развития современных методов оценки и обеспечения базовых свойств ТСИ.

#### Принципиальные методические положения.

*Переход от вариации коэффициентов пробега к вариации общих условий эксплуатации.* Представление вариации условий эксплуатации в виде



Рисунок 1 — Развитие современных научных направлений по оценке и обеспечению базовых свойств ТСИ

распределения нагрузочных параметров не универсально, поскольку понятие нагрузки для различных элементов машин отличается. Поэтому предложена новая модель, основанная на том, что разнообразие условий эксплуатации однотипных машин можно представить конечным набором типовых условий: городские условия, загородное шасси, проселочные дороги и т. д. При такой модели вариацию общих условий эксплуатации множества однотипных машин представляют вероятностным способом в форме распределений относительных продолжительностей типовых условий (рисунок 2).

Каждое из распределений такого спектра целесообразно описывать нормальным законом, параметры которого (среднее значение и среднеквадратическое отклонение) устанавливаются на основе экспериментальных данных либо экспертных оценок.

*Стиль вождения и ресурс.* Одной из новых задач является расчет ресурсных и функциональных свойств мобильных машин с учетом вариации

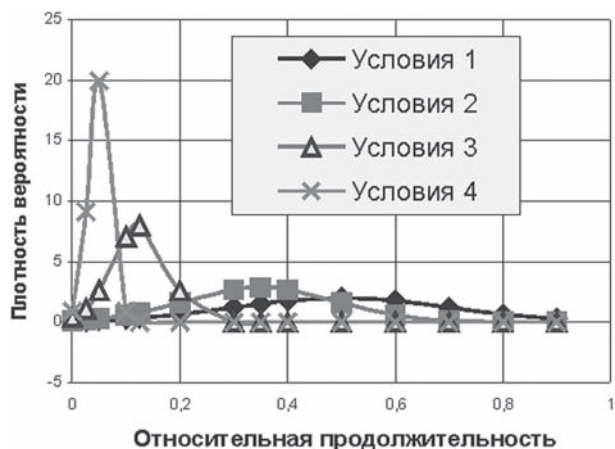


Рисунок 2 — Представление условий эксплуатации: вероятностный спектр относительных продолжительностей типовых условий

тивности действий оператора (водителя). Можно полагать, что при расчете трансмиссии различие в стилях вождения необходимо учитывать, поскольку динамическая нагруженность во многом определяет ее ресурс.

Вопросы определения динамических нагрузок трансмиссии рассмотрены в работе [1]. В [2] предложено классифицировать стиль вождения с использованием коэффициента свободной тяги  $k_{fc}$ . Он соответствует доле свободной тяги, которую водитель использует на разгон машины. Можно выделить три базовых значения коэффициента для соответствующих стилей:  $k_{fc} = 0,25$  — спокойный;  $k_{fc} = 0,5$  — активный;  $k_{fc} = 0,75$  — спортивный стиль. Эти значения относятся к нижней передаче трансмиссии. Высшие передачи используются в большей степени для поддержания заданной (принятой) скорости движения. Поэтому для высших передач можно принять, что коэффициент свободной тяги имеет меньшие значения:  $k_{fc} = 0,05$  — спокойный;  $k_{fc} = 0,1$  — активный;  $k_{fc} = 0,5$  — спортивный стиль. Для промежуточных передач принимаются промежуточные значения, определяемые интерполяцией.

Примеры расчета ресурса для групп деталей (зубчатые колеса, подшипники) входного (1 Input) и выходного валов (2 Output) коробки передач внедорожного пассажирского автомобиля полной массой 2550 кг для различных  $k_{fc}$  и коэффициентов сопротивления качению  $f_0$  представлены на рисунке 3 [2].

Видно, что чем ниже сопротивление качению, тем больше запас по тяге, и в большей степени ска-

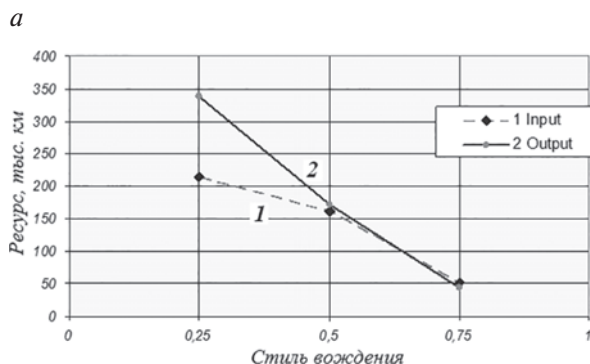
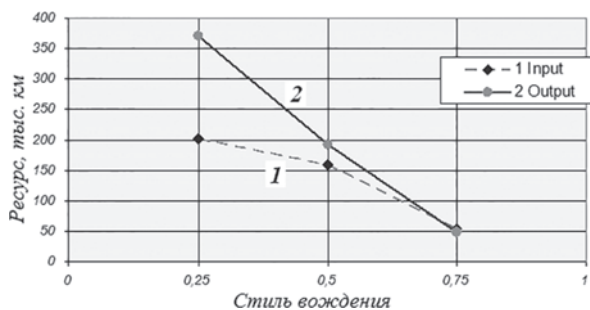


Рисунок 3 — Ресурс элементов в зависимости от стиля вождения для условий «Country»: а —  $f_0 = 0,025$ ; б —  $f_0 = 0,035$  [2]

зывается водительский фактор. Но  $f_0$  значительно менее значим по сравнению со стилем вождения.

Представление технически сложных изделий в виде иерархических схем отказов или предельных состояний. Для расчета показателей безотказности и (или) долговечности ТСИ формируется его иерархическая структурная схема, которая в зависимости от расчета принимает вид схемы отказов или ПС (далее — СПС) [3].

Схема имеет иерархическую структуру (типа дерева), состоит из объектов (составных частей машины) и схемных записей отказов (ПС) для объектов всех уровней, кроме низшего. Объекты низшего и промежуточных уровней наделяются типом: первый тип, второй и т. д. При этом объекты, отказы или ПС которых имеют одинаковую значимость для объекта более высокого уровня, относят к одному типу. Тип объекта соответствует его позиции (первой, второй и т. д.) в схемной записи, которая описывает условие (критерий) отказа или ПС.

Схемная запись ( $X_1, X_2$  и т. д.) означает, что отказ или ПС данного объекта имеет место, если отказы или ПС достигли его  $X_1$  и более составных частей первого типа,  $X_2$  и более составных частей второго типа и т. д. Машина или ее составная часть может иметь несколько СПС в зависимости от критериев ПС.

На рисунке 4 представлена СПС коробки передач, у которой предельное состояние определяется наступлением ПС одного из следующих объектов:

- картера, при котором требуется его замена или ремонт с демонтажем и полной разборкой;
- более двух шестерен постоянного зацепления;
- одного из валов;
- шестерни и подшипников вторичного вала.

При расчете показателей долговечности ресурс коробки передач определяется по каждой схемной записи, исходя из ресурсов ее объектов, а в качестве расчетного ресурса принимается меньшее из полученных значений. Эта процедура реализуется многократно в процессе расчета методом статистических испытаний Монте-Карло.

Ресурсно-прочностные кривые (РПК). При проведении расчетов показателей надежности методом статистического моделирования Монте-Карло целесообразно предварительно сформировать

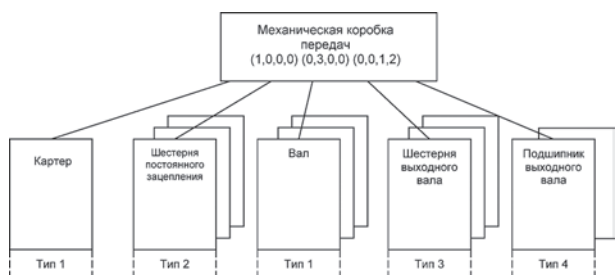


Рисунок 4 — Схема ПС механической коробки передач

и затем использовать в расчете в каждом цикле моделирования аппроксиматоры ресурса (наработки до отказа) вместо подробного расчета в каждом цикле моделирования. Аппроксиматор ресурса (наработки до отказа) — зависимость ресурса (наработки до отказа) элемента от характеристики несущей способности или иной характеристики, которая получена для определенных условий эксплуатации по результатам обработки расчетных, экспериментальных данных или мнений экспертов.

Типовым примером аппроксиматора ресурса являются РПК элемента для четырех условий эксплуатации, показанные на рисунке 5.

РПК используют для согласованного определения ресурсов (или наработок до отказа) для всех условий эксплуатации в зависимости от выбранного в процессе моделирования случайного значения параметра несущей способности. Тем самым РПК воспроизводят зависимость ресурсов (наработок)  $L$  элементов от нагруженности, и, в конечном счете, от условий эксплуатации. Варианты РПК — в вышеописанном базовом представлении и дополнительном (с использованием соотношения эквивалентной нагрузки и несущей способности) — приведены в [5].

РПК получают обычными детерминированными расчетами методами механики. В процессе расчета надежности значения ресурса используются на структурных уровнях. Этим обеспечивается связь моделей механики и структурной теории надежности.

Применением РПК обеспечивают проведение расчета по схеме «условия эксплуатации — ресурс», тем самым методически корректно обеспечивают взаимосвязанный выход из строя зависимых компонентов и гарантируют получение реальных расчетных показателей надежности системы, которые отличаются от заниженных величин, получаемых простым перемножением вероятностей безотказной работы элементов.

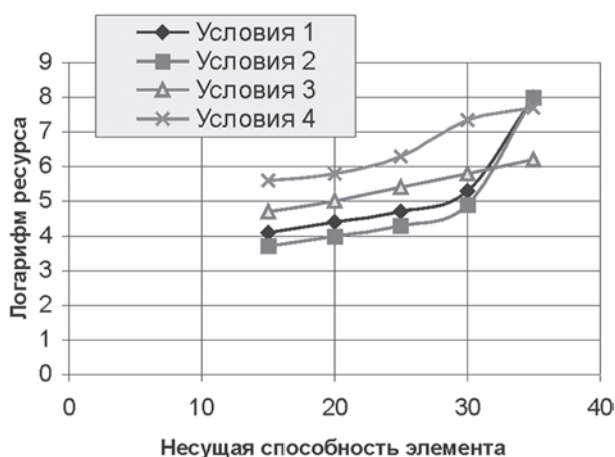


Рисунок 5 — РПК элемента для четырех условий эксплуатации

*Общий случай расчета реальной надежности ТСИ.* Основные процедуры общего случая расчета представлены на рисунке 6.

Относительные продолжительности условий эксплуатации  $\alpha_k$  и несущая способность элементов — случайные величины. Используя метод статистического моделирования (Монте-Карло), в каждом цикле моделирования генерируют относительную продолжительность условий эксплуатации  $\alpha_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) и несущую способность элементов.

Далее по РПК находят наработки до отказа (или предельного состояния) компонентов, а затем с учетом относительных продолжительностей условий — наработку системы в целом. Таким образом, наработки компонентов и системы формируются параллельно в рамках одной вычислительной процедуры. Тем самым воспроизводятся *реальные (согласованные) отказы компонентов* отдельной машины, а не отказы, основанные на статистических данных, которые получены обработкой отказов компонентов по совокупности наблюдаемых машин. Именно такие статистические данные используются как исходная информация в традиционной (структурной) теории надежности.

Повторением описанного цикла воспроизводятся потоки отказов и формируются данные для построения распределений наработок всех компонентов и системы (машины) по всем условиям эксплуатации.

В полном объеме процедура расчета показателей безотказности и долговечности выполняется

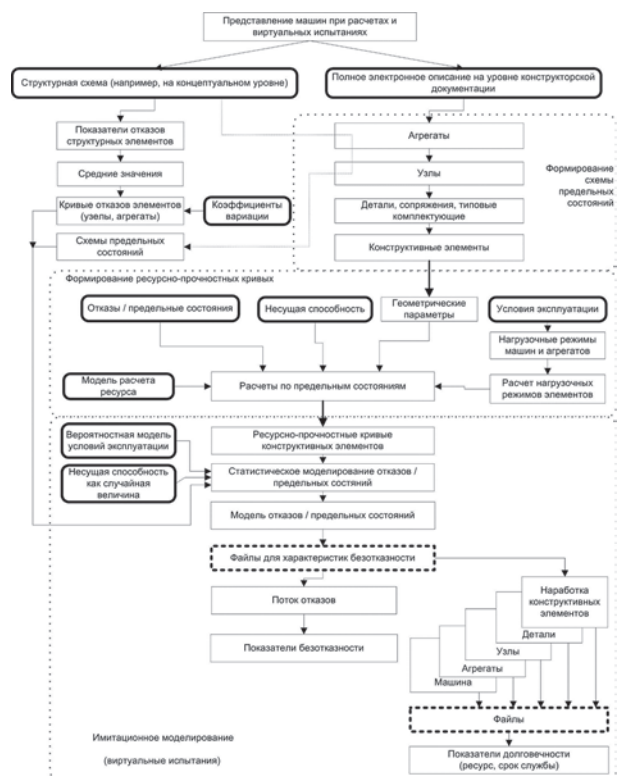


Рисунок 6 — Основные этапы расчета надежности

следующим образом. Основной инструмент расчета — метод статистических испытаний. На каждом шаге статистического моделирования воспроизводятся условия эксплуатации, представленные вероятностной моделью, и несущая способность элементов. Посредством РПК определяются наработки и отказы (предельные состояния) конструктивных элементов, а также деталей, сопряжений и стандартных компонентов (например, подшипников), если они описываются на физическом уровне. Далее на структурных уровнях определяются по сложной логике отказы (предельные состояния) узлов и т. д. — до уровня машины в соответствии с ее многоуровневой структурой [3]. Принципиальной особенностью расчета является то, что он соединяет в единой процедуре модели механики и структурной теории надежности.

Такой подход позволяет проводить расчеты надежности машины, ее агрегатов и систем при их различных представлениях (начиная с любого структурного уровня) и всех стадиях проектирования, включая ранние, концептуальные.

**Пример расчета показателей долговечности машины.** В рассматриваемом примере трактор представлен шестью ресурсопределяющими составными частями, из которых три относятся к трансмиссионным сборочным единицам. Рассматривается случай со сложной логикой предельных состояний.

В технических условиях указано: ресурс трактора считается исчерпанным, если потребовалась замена или проведение капитального ремонта не менее двух его основных частей (двигатель, коробка передач, задний мост, передний мост), включая двигатель, и хотя бы одной из дополнительных частей: полурамы (при ее наличии) и кабины. Такое определение предельного состояния трактора соответствует реальной практике и нормативным документам.

В схеме ПС трактор можно представить машиной, состоящей из составных частей трех типов, и описать двухуровневой СПС (рисунок 7). При этом запись (1, 1, 1) означает, что ПС машины наступает, если ПС имеют место у двигателя (тип 1), одного из основных агрегатов (тип 2) и одного из дополнительных агрегатов (тип 3).

Исходные данные представлены в верхней части таблицы, а результаты — в ее нижней части.

Расчет выполнен методом статистического моделирования Монте-Карло. Число испытаний составило 10 000. В каждом испытании генерировались ресурсы составных частей машины, затем с учетом критериев определялся ресурс машины. По завершении всех испытаний построено распределение ресурса машины и по нему определены средний и 80%-ный ресурсы [3].

При проведении испытаний фиксировался также случай расчета «до первого ПС» любой составной части. Этот результат приведен

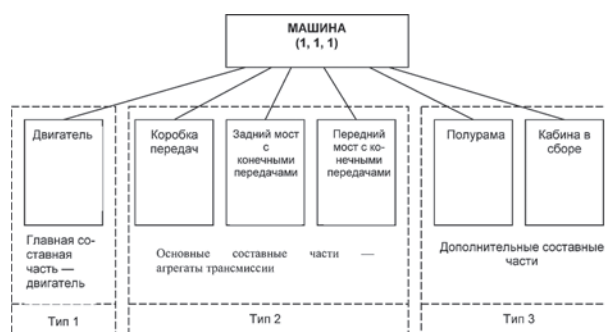


Рисунок 7 — Схема ПС машины с тремя типами составных частей

для сравнения с основным случаем расчета по СПС (1, 1, 1). Видно, что два представленных случая существенно отличаются по виду распределений и показателям долговечности.

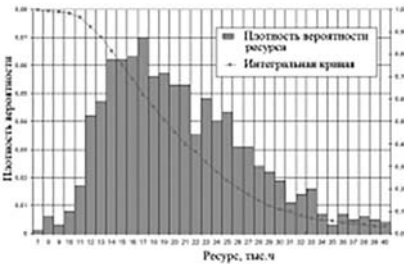
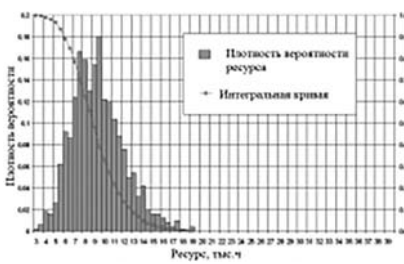
Подробное описание особенностей методов расчета реальной надежности машин и примеры их применения представлены в [3–5], ряд положений расчетов вошел в государственные стандарты [6, 7].

**Новые направления научной школы.** Создана национальная техническая комиссия «Надежность в технике». Объединенный институт машиностроения обеспечивает деятельность Национального технического комитета по стандартизации «Надежность в технике» (ТК ВУ33), созданного по предложению института приказом Госстандарта от 15.01.2015 г. № 3. Председателем ТК ВУ33 назначен В.Б. Альгин. В состав ТК входят ведущие организации Республики Беларусь в области теории и практики надежности изделий: ОАО «МАЗ»; ОАО «БЕЛАЗ»; ОАО «БМЗ»; ОАО «МЗОР»; ОАО «Гомсельмаш»; ГУ «Белорусская МИС»; РУП «Межотраслевая лаборатория по нормированию и экономии драгоценных металлов и драгоценных камней»; ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»; Белорусский государственный университет; БелГИСС; Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. В июле 2017 года в члены ТК принято ОАО «Гомельский завод литья и нормалей».

В период 2015–2016 гг. ТК подготовил государственные стандарты: СТБ 2465-2016 [6] и СТБ 2466-2016 [7]. Кроме того, некоторые члены ТК активно участвуют в качестве экспертов при подготовке стандартов Международной электротехнической комиссии (International Electrotechnical Commission, IEC).

С учетом мировых тенденций в последние годы прикладные разработки, выполняемые в рамках научной школы, основываются на трехстороннем взаимодействии: научной организации (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси), предприятия-изготовителя и предприятия-потребителя техники (эксплуатирующей

Таблица — Расчет ресурса машины

Объект	Распределение ресурса	Коэффициент вариации ресурса	Ресурс, ч	
			средний	80%-ный
Исходные данные				
Двигатель (тип 1)	Логарифмически нормальное	0,45	15 700	10 000
Коробка передач (тип 2)		0,55	17 300	
Передний ведущий мост (тип 2)		0,45	15 500	
Задний ведущий мост (тип 2)		0,45	15 800	
Кабина (тип 3)		0,50	17 000	
Результаты расчета ресурса машины				
Машина в целом с учетом схемы ПС (1, 1, 1)		0,38	20 700	14 230
Машина в целом до первого ПС составной части (приведено для сравнения)		0,29	9100	6870

организации). Это позволяет создавать новые аналитические инструменты, оперативно анализировать данные о надежности ТСИ в эксплуатации, использовать их для совершенствования изделий. В результате вопросы, относящиеся к области эксплуатации: расхода ресурса составных частей и машины в целом, диагностики и мониторинга надежности ТСИ — становятся все более актуальными.

*Расход ресурса машины в эксплуатации.* Несмотря на развитость терминологического аппарата теории надежности, понятие *расхода ресурса машины* до разработок белорусской школы отсутствовало. На практике возможна ситуация, когда одна или несколько составных частей машины являются слабыми звеньями и достижение ими предельных состояний приводит, по крайней мере формально (на основании критерия предельного состояния), к исчерпанию ресурса машины. Вместе с тем, некоторые узлы могут обладать определенным остаточным ресурсом, хотя по признакам предельного состояния автомобиль в целом ресурс исчерпал. Целесообразно было выработать понятие расхода ресурса машины как системы,

которое позволяло бы учитывать ресурсы ее работоспособных составных частей.

С учетом сказанного применительно к мобильной технике введено понятие расхода ресурса автомобиля как базовое. Расход ресурса  $K_{AT}$  образца автомобильной техники (АТ) трактуется как *средневзвешенный расход ресурса его основных частей*

$$K_{AT} = \sum_{i=1}^N \xi_i K_{pi}, \quad (1)$$

где  $K_{pi}$  — расход ресурса  $i$ -й основной части образца АТ;  $\xi_i$  — удельный показатель, имеющий смысл доли или вклада расхода ресурса  $i$ -й основной части в совокупном расходе ресурса АТ.

Введенное понятие расхода ресурса подкрепляется физическим смыслом — степенью повреждения основных частей объекта. Теоретически машина может обладать неограниченным сроком службы, вследствие регулярного обновления ее составных частей и тем самым повышения остаточного ресурса, имеющего смысл ресурсного потенциала частей машины.

Принципиальную особенность также имеет подход к определению расхода ресурса  $K_p$  основной части образца АТ как функции наработки и возраста:

$$K_p = 1 - (1 - K_L)(1 - K_T), \quad (2)$$

где  $K_L$  — расход ресурса по пробегу;  $K_T$  — расход по возрасту (оба показателя в относительных единицах). Зависимость имеет универсальный характер, как частные случаи она включает известные зависимости, используемые для оценки физического износа машин. Кроме того, следует отметить, что в общепринятых расчетах долговечности рассматривается только первая составляющая. Вторая составляющая имеет существенное значение для машин, которые эксплуатируются периодически, а длительное время находятся на консервации, что характерно для военной техники и техники МЧС.

Для определения  $K_L$  и  $K_T$  основных частей АТ разработаны соответствующие модели, основанные на линейных (рекомендуемых для  $K_L$ ) и экспоненциальных (рекомендуемых для  $K_T$ ). Показано, что даже при линейных  $K_L$  и  $K_T$  кривая  $K_p$  имеет нелинейный по времени (возрасту АТ) характер (рисунок 8) [3].

Разработанные на основе введенных понятий и моделей методики использованы в организациях Министерства обороны при оценке расхода ресурса автомобильной техники (см., например, [8]).

*Управление надежностью на основе мониторинга режимов работы технически сложных изделий.* Интерактивное управление надежностью предусматривает управление не только по фактам отказов, но и главным образом по процессам, которые обуславливают отказы. При этом система обеспечивает постоянное информирование оператора (водителя) о процессах, связанных с исчерпанием ресурса ТСИ (рисунок 9) [3, 6].

Получаемые при эксплуатации данные о процессах и отказах должны не только отправляться на сервер для фиксации, накопления и анализа,

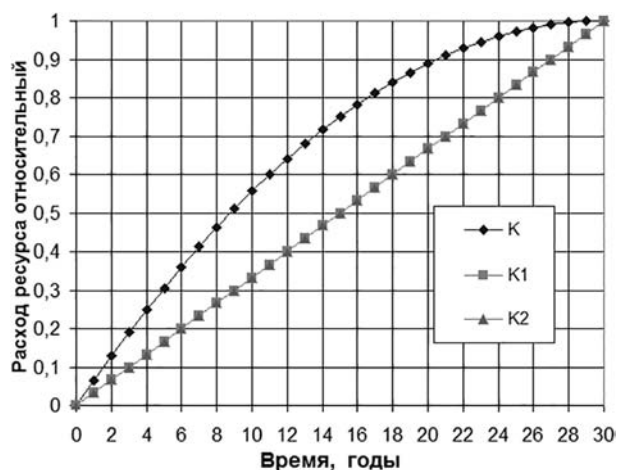


Рисунок 8 — График расхода ресурса при линейных законах  $K_1$  и  $K_2$  (на графике  $K_1$  и  $K_2$  совпадают) [3]



Рисунок 9 — Структура интерактивной системы управления надежностью [3, 6]

но и обрабатываться в режиме онлайн на вычислительном устройстве, встроенном в ТСИ, и предоставляться оператору (водителю) и/или специалисту-аналитику в текущем режиме в том числе с использованием технологий Индустрии 4.0.

Онлайновые подходы и реализуемые сервисы, основанные на разработанных методиках, отличают предлагаемую систему от известной системы FRACAS (сравнение систем приведено в [3]).

*Техническая диагностика.* Наиболее важным моментом в диагностике механизмов и механических конструкций в процессе их эксплуатации является возможность выявления наличия в определенном узле системы неисправности или дефекта на ранней стадии его возникновения. Такой подход позволяет своевременно реагировать на развивающийся дефект, что, в свою очередь, позволяет предотвратить поломку всей системы и избежать аварийной ситуации. С целью сокращения финансовых и временных затрат на техническое обслуживание ТСИ современная диагностическая система должна использовать безразборный контроль его состояния.

Во многих случаях названные задачи успешно разрешаются методами и средствами виброакустической диагностики. В настоящее время методические и инструментальные средства вибродиагностики уже позволяют перейти от затратного планово-предупредительного обслуживания машин и оборудования к менее затратному обслуживанию по фактическому состоянию [9, 10].

Обслуживание по фактическому состоянию базируется на получении объективной и достоверной информации о техническом состоянии механической системы во время ее эксплуатации без остановки и разборки. Суть технологии состоит в том, что обслуживание и ремонт производятся в зависимости от реального текущего технического состояния механизма, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-либо разборок и ревизий, на базе контроля и анализа соответствующих параметров. При этом определяются реальные причины происходящих изменений в каждой конкретной ситуации, принимаются обоснованные решения по их устранению.

Особую актуальность вопросы обслуживания по фактическому состоянию имеют для трансмиссионных узлов мобильной техники. Элементы

трансмиссии работают в условиях высоких скоростей и нагрузок, и их состояние в значительной степени определяет техническое состояние машины в целом. Время безотказной работы элементов трансмиссии является величиной случайной, так как наработка на отказ каждой сборочной единицы различна и колеблется в широких пределах. Поэтому, как правило, выявляется наиболее «слабое» звено или элементы, определяющие показатели надежности и ресурса узла в целом, и методами безразборной диагностики отслеживается их техническое состояние в процессе эксплуатации. В ряде случаев такими слабыми элементами в трансмиссионных узлах мобильных машин являются зубчатые передачи. В частности, мониторинг местных повреждений зуба зубчатого колеса (износ, питтинг, сколы, трещины и т. д.) наиболее важен, т. к. большой процент (до 60 %) повреждений трансмиссионных механизмов происходит вследствие выхода из строя зубчатого колеса, который, в свою очередь, инициируется местным повреждением зуба.

Все это в полной мере относится и к планетарно-рядным зубчатым передачам редукторов мотор-колес (РМК) большегрузных карьерных самосвалов БЕЛАЗ, часто лимитирующим ресурс работы этих уникальных машин. С увеличением срока эксплуатации машин возрастают объемы работ по их ремонту и техническому обслуживанию. Необходимо постоянно вести мониторинг технического состояния сборочных единиц машины и с помощью комплекса мероприятий технического обслуживания поддерживать их в работоспособном состоянии.

Особенностью вибродиагностики трансмиссионных узлов в условиях эксплуатации машин во многих случаях является невозможность использования стандартных виброакустических средств контроля. Это связано с тем, что подавляющее большинство разработанных диагностических методов и стандартных инструментальных средств ориентированы на диагностику подшипниковых узлов и наиболее эффективны при диагностировании роторных узлов машин, работающих в квазистационарных условиях, т. е. в условиях, когда рабочие скорости и нагрузки меняются незначительно, а динамика механизма обусловлена в основном геометрическими погрешностями изготовления и монтажа деталей и их изменениями в процессе эксплуатации. Это различные редукторы технологического оборудования, испытательные и обкаточные стенды, вентиляторы, турбины, компрессоры, насосы, редукторы авиационной техники и др. Вибрационные характеристики таких машин при нормальном функционировании имеют достаточно стабильный характер, что значительно упрощает разработку алгоритмов съема и анализа диагностической информации.

Трансмиссионные системы автотракторной техники работают, как правило, в условиях практически постоянно меняющихся скоростей и нагрузок. Большое влияние на вибрационные характеристики узлов трансмиссии, помимо внутренних факторов, оказывают внешние динамические воздействия, обусловленные рельефом и покрытием дороги, степенью загрузки автомобиля, квалификацией водителя и др. В таких условиях характер вибраций (амплитудный и частотный состав) постоянно меняется и использование серийно выпускаемой аппаратуры для вибромониторинга технического состояния элементов трансмиссии путем спектрального анализа в процессе эксплуатации автомобиля оказывается весьма затруднительным. Поэтому для диагностики трансмиссионных систем эксплуатируемой автотракторной техники необходимы специальные методы и средства.

Указанные задачи сегодня особенно актуальны применительно к карьерной технике и решаются в рамках совместных работ Объединенного института машиностроения и ОАО «БЕЛАЗ» по заданиям государственных программ. В ОИМ разработана уникальная методология вибрационно-импульсного диагностирования и вибромониторинга трансмиссионных узлов ТСИ, позволяющая прогнозировать их остаточный ресурс в процессе эксплуатации. Существенным отличием предложенных подходов от известных является возможность оценки технического состояния сложных мобильных механических систем в условиях их работы при переменных нагрузках и скоростях движения. Разработанные методические подходы базируются на результатах теоретических исследований, связанных с решением задач ударного пересопределения зубчатых профилей применительно к задачам вибродиагностики, анализе расчетно-экспериментальных диагностических моделей механизма, связывающих уровень предельных вибраций узла со степенью и накоплением повреждений его элементов в эксплуатации [11].

Износ и контактное выкрашивание изменяют параметры зацепления зубчатой передачи и величины контактных площадок, усталостные трещины — жесткость зацепления. Это приводит к изменению величин динамических составляющих нагрузки в зубчатом зацеплении. В свою очередь, величина динамической нагрузки определяет уровень виброакустической активности зубчатой передачи, что дает возможность установить взаимосвязь динамической составляющей нагрузки с параметрами вибраций и далее со степенью износа и контактного выкрашивания отдельных пар зубьев, а также появлением усталостных трещин у ножек зубьев. Таким образом, используя корреляционную связь между параметрами износа (контактного выкрашивания) и изменением пара-



метров вибраций в процессе эксплуатации, можно оценивать текущее техническое состояние и остаточный ресурс зубчатых механизмов.

В 2015 году докторская диссертация Н.Н. Ишина «Теоретические и экспериментальные методы и средства вибрационно-импульсного диагностирования зубчатых передач трансмиссионных узлов мобильных машин», посвященная вопросам развития вышеизложенной методологии, признана ВАК РБ лучшей работой в номинации «Технические и сельскохозяйственные науки».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы при создании методических и программно-инструментальных средств вибромониторинга планетарных редукторов мотор-колес (РМК) большегрузных самосвалов «БЕЛАЗ» в процессе их карьерной эксплуатации. Разработка аппаратной части системы вибромониторинга редукторов мотор-колес основывалась на методике и алгоритмах, охватывающих ключевые моменты технологии диагностирования редукторных систем данного типа и непосредственно обеспечивающих сбор, обработку и выдачу информации о степени опасности диагностируемых состояний [12–14].

Структурная схема системы вибромониторинга редуктора мотор-колеса большегрузного самосвала представлена на рисунке 10 [6].

Работа системы базируется на методе вибрационно-импульсного диагностирования зубчатых передач, который включает [11]

- анализ параметров виброимпульсов, синхронизированных с углом поворота диагностируемого зубчатого колеса;

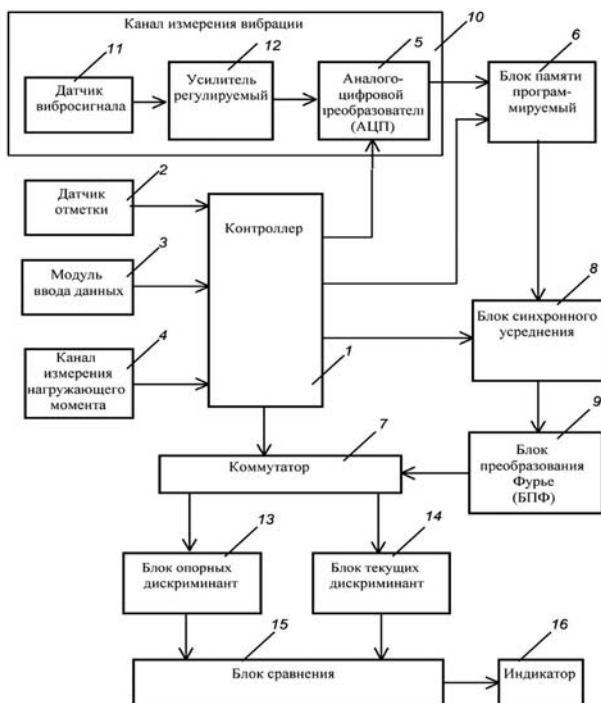


Рисунок 10 — Структурная схема системы вибромониторинга РМК «БЕЛАЗ»

- выявление гармонических составляющих виброимпульса, кратных зубцовой частоте, находящихся в области резонансных частот механизма и возбуждающих в нем наиболее интенсивные колебания;

- определение технического состояния зубчатых передач при переменных нагрузочно-скоростных режимах их работы по изменению параметров виброимпульсов.

Система периодически опрашивает датчики, установленные на бортовых редукторах, автоматически обрабатывает диагностическую информацию, оценивает техническое состояние каждой зубчатой передачи редуктора и своевременно информирует об этом оператора (водителя) индикацией соответствующего светового сигнала:

- вибрационные параметры редуктора находятся в пределах допустимых значений (эксплуатация без ограничений) — зеленый цвет;

- вибрационные параметры редуктора периодически выходят за пределы допустимых значений — желтый цвет. При этом эксплуатация машины продолжается, ремонтная служба проводит углубленный анализ вибраций РМК с определением дефектного элемента и прогнозом его остаточного ресурса [14, 15].

При техническом обслуживании проводится вскрытие редуктора, оценивается возможность устранения причин повышенной вибрации (регулировка, затяжка соединений, долив масла и др.) и принимается решение о проведении ремонта или дальнейшей эксплуатации самосвала; - вибрационные параметры РМК находятся за пределами допустимых значений, возможен аварийный выход редуктора из строя — красный цвет. При этом машина должна направляться в ремонт.

На рисунке 11 приведен алгоритм процесса вибродиагностики РМК, реализованный в бор-

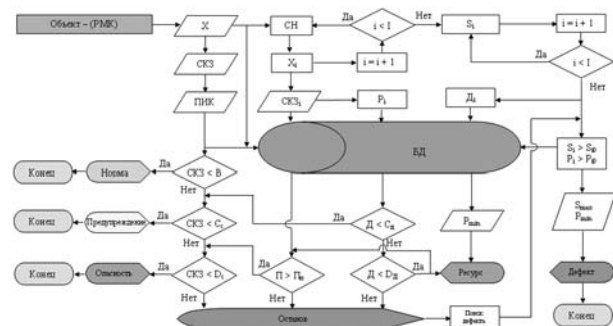
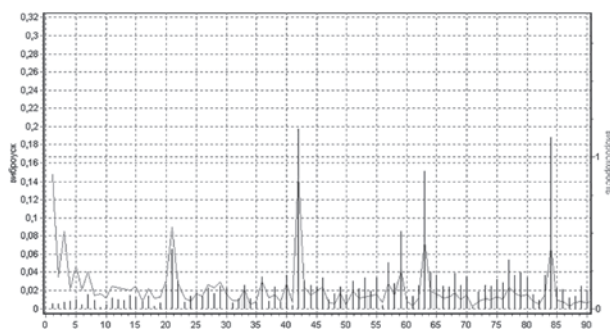


Рисунок 11 — Алгоритм обработки вибраций при диагностировании РМК:  $X$  — текущий вибросигнал;  $I$  — количество зубчатых пар;  $X_i$  — вибрация  $i$ -й зубчатой пары;  $S_i$  — спектр  $i$ -й зубчатой пары;  $S_{i0}$  — маска спектра  $i$ -й зубчатой пары;  $P$  — ПИК-фактор; СКЗ — среднее квадратическое значение;  $D$  — дискриминант; СКЗ и дискриминант  $i$ -й зубчатой пары;  $P_i$  — текущий ресурс  $i$ -й зубчатой пары;  $P_{i0}$  — плановый ресурс  $i$ -й зубчатой пары;  $P_n$  — значение предыдущего замера ПИК-фактора;  $V_c$  — граница зоны  $V_c$  для СКЗ;  $C_c$ ,  $C_d$  — границы зоны  $C$  для СКЗ и дискриминанта;  $D_c$ ,  $D_d$  — границы зоны  $D$  для СКЗ и дискриминанта; БД — база данных; СН — синхронное накопление

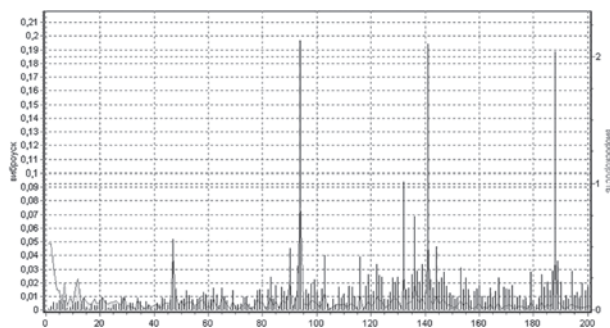
товой системе вибромониторинга редуктора мотор-колеса самосвала.

Ухудшение состояния контактирующих поверхностей кинематических пар сопровождается ростом амплитуд ударных импульсов, а также спектральных составляющих практически во всем частотном диапазоне вибросигнала, но каждая из пар характеризуется своими частотами возбуждения. Для зубчатой пары — это частота вращения вала и зубцовая частота, каждая из которых является образующей для целого гармонического ряда частот. Таким образом, в вибрационном спектре передач зацеплением существует ярко выраженный гармонический ряд, амплитуды которого при этом являются компонентами  $n$ -мерного вектора диагностических признаков технического состояния  $i$ -го узла механизма. Такой вектор-признак аккумулирует информацию о поведении диагностируемой передачи с учетом перераспределения колебательной энергии между компонентами гармонического ряда.

На рисунке 12 показаны отдельные, полученные с помощью созданной бортовой системы вибромониторинга гармонические спектры валов первой ступени РМК «БЕЛАЗ». На спектрах присутствуют ряды гармоник, характеризующие диагностируемые элементы, в данном случае зубчатые колеса. На рисунке 12 *a* это гармоники 21, 42, 63 и 84 зубцовой частоты  $f_z$  солнечной шестерни с числом зубьев  $z = 21$ , и кратных ей частот  $2f_z$ ,  $3f_z$  и  $4f_z$ . Соответственно, для спутников с числом



*a*



*b*

Рисунок 12 — Гармонические спектры вибраций элементов планетарного ряда РМК: *a* — солнечной шестерни; *b* — спутников

зубьев  $z = 47$  это гармоники 47, 94, 141 и 188 (рисунк 12 *b*).

Полученные гармонические спектры позволяют либо отслеживать изменение амплитуды  $S$  соответствующей гармоники на характерных частотах в зависимости от наработки механизма, либо формировать из амплитуд гармонических составляющих комплексные критерии — безразмерные дискриминанты. Изменение величины дискриминанта, выбранного на основании экспериментальных исследований,  $\beta_{f_z} = (S_{f_z} + S_{2f_z})^{1/2}$  и содержащего амплитуды двух первых гармоник зубцовой частоты коронной шестерни для редуктора без дефектов, а также после появления в процессе эксплуатации самосвала скола зуба на указанной шестерне, показано на рисунке 13.

Созданные методология, инструментальные и программные средства безразборной оценки технического состояния трансмиссионных узлов машин предназначены для своевременного предупреждения в условиях эксплуатации машины о предаварийном состоянии зубчатых приводных механизмов для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом автомобиля из строя. Применение бортовой системы вибромониторинга обеспечивает повышение сроков службы и эксплуатационной готовности техники, переход от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по фактическому состоянию, снижение времени простоя автомобильной техники, сокращение затрат на их обслуживание и ремонт.

Для развития данной тематики в настоящее время прорабатываются вопросы многостороннего сотрудничества ОИМ НАН Беларуси, ОАО «БЕЛАЗ», ЗАО «Союзтехноком» (Россия), ОАО «Кузбасская топливная компания» (Россия) в области создания системы мониторинга технического состояния карьерного самосвала (в системе «Интеллектуальный карьер») с целью прогнозирования ресурса отдельных агрегатов и узлов, а также подготовки рекомендаций об экономической целесообразности сроков списания карьерных самосвалов для правильного формирования программы техпереворужения парка и экономии материальных и финансовых средств добывающих предприятий.

**Заключение.** В заключение можно констатировать, что отечественная научная школа оценки

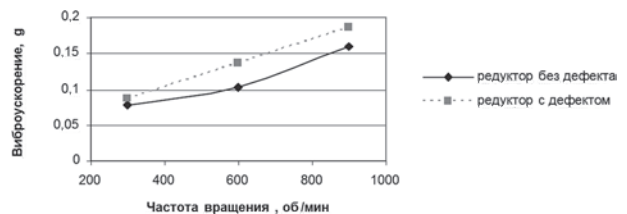


Рисунок 13 — Зависимость дискриминанта  $\beta_{f_z}$  от частоты вращения ведущего вала для дефектного (пунктир) и бездефектного (сплошная линия) редукторов

и обеспечения надежности технически сложных изделий машиностроения успешно развивается в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, применение результатов ее работ на практике во многом определяет конкурентоспособность отечественных технически сложных изделий на мировых рынках.

### Список литературы

1. Альгин, В.Б. Динамика трансмиссии автомобиля и трактора / В.Б. Альгин, В.Я. Павловский, С.Н. Поддубко; под ред. И.С. Цитовича. — Минск: Наука и техника, 1986. — 214 с.
2. Альгин, В.Б. Определение нагрузочных режимов автомобиля и ресурса его агрегатов с учетом стиля вождения и дорожных условий / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 1(10). — С. 6–11.
3. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
4. Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с.
5. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с. — Гл. 1: История и современное состояние белорусской научной школы расчета и проектирования трансмиссий мобильных машин. — С. 10–76.
6. Надежность в технике. Менеджмент надежности технически сложных изделий: СТБ 2465-2016. — Введ. 01.06.2017.
7. Надежность в технике. Расчет надежности технически сложных изделий: СТБ 2466-2016. — Введ. 01.06.2017.
8. Инструкция о порядке определения расхода ресурса автомобильной техники, закрепленной за Министерством обороны Республики Беларусь на праве оперативного управления: утв. приказом Министерства обороны Республики Беларусь от 27.11.2007 № 57.
9. Радкевич, Я.М. Методология оценки качества и управление состоянием горных машин с использованием вибрационных характеристик / Я.М. Радкевич, М.С. Островский, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 10. — С. 8–12.
10. Мобильная система мониторинга состояния // Evolution. — 2009. — № 2. — С. 24–30.
11. Ишин, Н.Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н.Н. Ишин. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 432 с.
12. Ишин, Н.Н. Vibrating Monitoring Technical Condition of the Transmission Systems of Mobile Machines = Вибромониторинг технического состояния трансмиссионных систем мобильных машин / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов // Изв. высших учебных заведений. Машиностроение. — 2015. — № 11(668). — С. 21–28.
13. Ишин, Н.Н. Методические подходы к созданию инструментальных средств диагностики трансмиссионных систем автомобиля в условиях эксплуатации. / Н.Н. Ишин, В.И. Адашкевич, А.С. Скороходов // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 1(10). — С. 57–62.
14. Прогнозирование остаточного ресурса зубчатых приводов на основе вибрационно-импульсного диагностирования / Н.Н.Ишин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 1(34). — С. 36–39.
15. Прогнозирование остаточного ресурса планетарных редукторов / Н.Н.Ишин [и др.] // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 2. — С. 21–25.

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

Deputy General Director in Science<sup>1</sup>

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

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

Director of R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>

E-mail: nik\_ishin@mail.ru

<sup>1</sup>Joint 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 THE NAS OF BELARUS. PART 2: DEVELOPMENT

*The second part examines the main stages of the development of the scientific school and the fundamental and applied results obtained, which cover the issues of understanding the essence of reliability of technically complex items (TCI), assessing and ensuring their reliability at the design stage, life expense, and monitoring and reliability diagnostics in the operation of TCI. The interdisciplinary direction “Lifetime mechanics of machines” is presented, which examines from a single point of view the problems of evaluation and provision of functional and lifetime properties of the machine and implements this approach in the appropriate principles, models and methods. New directions in the development of the scientific school related to forecasting individual item reliability are considered: dependability management based on monitoring the machine operation modes using lifetime expense models, the methodology of vibration-impulse diagnosis of gears implemented in the on-board vibration monitoring system of the motor-wheel of a mining dump truck.*

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

## References

1. Algin V.B., Pavlovsky V.Ya., Poddubko S.N. *Dinamika transmisiy avtomobili i traktora* [Dynamics of transmission of cars and tractors]. Minsk, Nauka i tehnika, 1986. 214 p.
2. Algin V.B., Verbitsky A.V. *Opređenje nagruzochnykh rezhimov avtomobilja i resursa ego agregatov s uchetom stilja vozhdenija i dorozhnykh uslovij* [Determination of the load modes of the car and the lives of its units, taking into account the driving style and road conditions]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2010, no. 1(10), pp. 6–11.
3. Algin V.B. *Raschet mobilnoj tehniki: kinematika, dinamika, resursy* [Calculation of mobile technics: kinematics, dynamics, life]. Minsk, Belaruskaya navuka, 2014. 271 p.
4. Algin V.B. *Dinamika, nadezhnost i resurnoe proektirovanie transmisiy mobilnykh mashin* [Dynamics, reliability and lifetime design of transmissions of mobile machines]. Minsk, Navuka i tjechnika, 1995. 256 p.
5. Algin V.B., Starzhinsky V.E. *Zubchatye peredachi i transmisiy v Belarusi: proektirovanie, tehnologija, ocenka svojstv. Gl. 1: Istorija i sovremennoe sostojanie belorusskoj nauchnoj shkoly rascheta i proektirovanija trammissij mobilnykh mashin* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, estimation of properties. Part 1: History and current state of the Belarusian scientific school of calculation and design of transmissions of mobile cars]. Minsk, Belaruskaja navuka, 2017, pp. 10–76.
6. STB 2465-2016. *Nadezhnost v tehnike. Menedzhment nadezhnosti tehničeski slozhnykh izdelij*. [State Standard of the Republic of Belarus STB 2465-2016. Dependability in technics. Dependability management of technically complicated items]. 2017.
7. STB 2466-2016. *Nadezhnost v tehnike. Raschet nadezhnosti tehničeski slozhnykh izdelij*. [State Standard of the Republic of Belarus STB 2466-2016. Dependability in technics. Dependability calculation of technically complicated items]. 2017.
8. Prikaz Ministerstva oborony Respubliki Belarus. *Ob utverzhenii Instrukcii o porjadke opredelenija rashoda resursa avtomobilnoj tehniki, zakreplennoj za Ministerstvom oborony Respubliki Belarusanprave operativnogo upravlenija* [Order of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus. On approval of the Instruction on the procedure for determining the expenditure of the lifetime of vehicles, assigned to the Ministry of Defense of the Republic of Belarus on the right of operational control]. 2007, no. 57.
9. Radkevich Ya.M., Ostrovsky M.S., Boiko P.F. *Metodologija ocenki kachestva i upravlenie sostojaniem gornyx mashin s ispolzovaniem vibracionnykh harakteristik* [Methodology for assessing quality and controlling the state of mining machines using vibration characteristics]. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika* [Mining equipment and electromechanics], 2008, no. 10, pp. 8-12.
10. *Mobilnaja sistema monitoringa sostojanija* [Mobile monitoring system of the state]. *Evolution*, 2009, no. 2, pp. 24-30.
11. Ishin N.N. *Dinamika i vibromonitoring zubchatykh peredach* [Dynamics and vibration monitoring of gears]. Minsk, Belaruskaya navuka, 2013. 432 p.
12. Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S. *Vibromonitoring tehničeskogo sostojanija transmisionnykh sistem mobilnykh mashin* [Vibrating Monitoring Technical Condition of the transmission systems of mobile machines]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], MGTU im. N. Bauman, 2015, no. 11(668), pp. 21-28.
13. Ishin N.N., Adashkevich V.I., Skorokhodov A.S. *Metodicheskie podhody k sozdaniju instrumentalnykh sredstv diagnostiki transmisionnykh sistem avtomobilja v uslovijah jekspluatacii* [Methodical approaches to the creation of diagnostic tools for vehicle transmission systems in operation]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2010, no. 1(10), pp. 57-62.
14. Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Natureva M.K., Adashkevich V.I. *Prognozirovanie ostatochnogo resursa zubchatykh privodov na osnove vibracionno-impulsnogo diagnostirovanija* [Forecasting the residual life of gear drives based on vibration-pulse diagnosis]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 1(34), pp. 36-39.
15. Ishin N.N. [et al.] *Prognozirovanie ostatochnogo resursa planetarnykh reduktorov* [Forecasting the residual life of planetary gearboxes]. *Vestnik mashinostroenija* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2015, no. 2, pp. 21–25.