



# ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 621.01-192:[531.1+531.3]

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.  
генеральный директор<sup>1</sup>  
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

**В.Б. АЛЬГИН**, д-р техн. наук, проф.  
заместитель начальника НТЦ «Карьерная техника»<sup>1</sup>  
E-mail: vladimir.algin@gmail.com

Н.Н. ИШИН, д-р техн. наук, доц.  
начальник НТЦ «Карьерная техника»<sup>1</sup>  
E-mail: nik\_ishin@mail.ru

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.  
заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров»<sup>2</sup>  
E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.06.2021.

## ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ МЕХАНИКИ ПРИВОДОВ. ЧАСТЬ 2. РЕСУРСНАЯ МЕХАНИКА МАШИН И АРХИТЕКТОНИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

*Рассматриваются инновационные разработки в области механики приводов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси в сотрудничестве с Институтом механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси и другими организациями. Основное внимание уделяется результатам, отмеченным в конкурсе ТОП-10 НАН Беларуси, в котором творческий коллектив специалистов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси стал лауреатом, а также монографии «Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств», ставшей призером во Всероссийском конкурсе имени первопечатника Ивана Федорова 2020 года в номинации на лучшую публикацию по научно-исследовательской работе. Также представлены новые результаты, полученные авторами в 2020–2021 годах по рассматриваемой тематике. Статья содержит положения ресурсной механики машин, развиваемой в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, включая определение прочности как ресурса; представления о надежности технически сложных изделий (ТСИ); описание разработанной системы диагностики привода; понятие расхода ресурса в аспекте оценки индивидуального состояния многокомпонентного изделия, а также вопросы прогнозирования и управления состоянием ТСИ.*

**Ключевые слова:** технически сложное изделие, ресурсная механика машин, прочность, надежность, расход ресурса, имитационное моделирование, диагностика привода, информационная модель, многокомпонентное изделие

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-5-12>

**Введение.** Рассматриваемая проблематика относится к процессным инновациям и охватывает НИР, ОКР, стандартизацию и эксплуатацию элементов приводов как технически сложных изделий. Недавним достижением представителей Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (В.Б. Альгин, Н.Н. Ишин, С.Н. Поддубко) и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси (С.В. Шилько) стало создание информационных моделей — цифровых двойников гидро- и электромеханических приводов для проектирования и мониторинга транспортных машин нового поколения, вошедшее в ТОП-10 результатов деятельности ученых НАН Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований за 2020 год [1]. Успех также сопутствовал коллективной монографии «Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств» под общей редакцией В.Б. Альгина и В.Е. Старжинского [2], написанной с участием сотрудников Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, ставшей призером Всероссийского конкурса имени первопечатника Ивана Федорова 2020 года в номинации на лучшую публикацию по научно-исследовательской работе.

Ниже изложены основные положения ресурсной механики машин, развиваемой в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, включая определение прочности как ресурса; представления о надежности технически сложных изделий; описание разработанной системы диагностики привода; понятие расхода ресурса в аспекте оценки индивидуального состояния многокомпонентного изделия, а также вопросы прогнозирования и управления состоянием технически сложного изделия.

**Прочность как ресурс.** Расчеты на прочность (в широком смысле, включая оценку долговечности) различных элементов (частей) ТСИ выполняются в разной форме (коэффициенты запаса, допускаемые напряжения). Поэтому первая задача — привести результаты расчетов при оценке долговечности различных деталей к единой ресурсной форме

$$L = f(\sigma_r, OC),$$

где  $\sigma_r$  — характеристика несущей способности; OC (operating conditions) — условия эксплуатации (УЭ).

Для этой цели могут быть использованы уравнения вида (1)–(3):

$$R = \sigma_r^m N_0; \quad (1)$$

$$q = \sigma_R^m N_1 K_p; \quad (2)$$

$$L = R/q, \quad (3)$$

где  $R$  — циклоустойкость (мера несущей способности);  $q$  — единичная циклонапряженность (мера повреждения на единицу наработки);  $L$  — ресурс;

$\sigma_r$  — предел выносливости или иной сходный параметр рассчитываемой детали;  $m$  — показатель кривой усталости ( $S-N$  curve exponent);  $N_0$  — базовое число циклов нагружения (endurance limit cycles) для  $\sigma_r$ ;  $\sigma_p$  — расчетное напряжение, соответствующее расчетной нагрузке (например, расчетной удельной тяге для автомобиля или расчетному моменту в спектре нагрузок).

Если критерий прочности определяется по правилу Пальмгрена–Майнера, как например в [3], то переход к ресурсному виду возможен по формуле

$$L = \frac{L_{PM}}{\sum \frac{n_i}{N_i}}, \quad (4)$$

где  $L_{PM}$  — наработка, для которой определяется число циклов нагружения в рассматриваемых условиях эксплуатации действием спектра напряжений;  $N_i$  — число циклов до разрушения по кривой усталости при действии нагрузки  $i$ -го уровня;  $n_i$  — число циклов действия нагрузок  $i$ -го уровня. При этом  $\sum n_i$  соответствует  $L_{PM}$ .

Следующая задача в этом блоке — выполнить серию расчетов ресурса для различных УЭ объекта и представить результаты в компактном виде с возможностью последующего использования при имитационном моделировании надежности методом Монте-Карло. Для этого разработаны *аппроксиматоры ресурса* в виде графиков или аналитических зависимостей.

Аппроксиматор ресурса — зависимость ресурса элемента от характеристик его несущей способности (или другой характеристики), которая была получена для определенных УЭ по результатам обработки расчетных или экспериментальных данных, а также на основании заключений экспертов. Аппроксиматоры ресурса — новый расчетный инструмент, который позволяет заинтересованной стороне сначала спроектировать пространство УЭ, а затем определить время жизни изучаемых элементов без подробного подсчета результатов для различных комбинаций УЭ.

Типичным примером аппроксиматоров ресурса являются ресурсно-прочностные кривые (РПК), которые строятся для выделяемых типовых условий эксплуатации (рисунок 1 а). При необходимости их можно определить и подробно представить для определенных УЭ (см. рисунок 1 б) [4].

**Надежность ТСИ. Модель «несущая способность — ресурс».** Эта модель связывает свойства и процедуры, относящиеся к «прочности» и «надежности», и позволяет перейти от характеристик несущей способности к распределениям ресурса компонентов с использованием РПК. Процедура, реализующая эту модель, показана на рисунке 2; она также реализована в компьютерной программе LSCurve [5].

Разработанная процедура и реализующая ее компьютерная программа LSCurve (Strength — LSC — Lifetime) предназначены для:

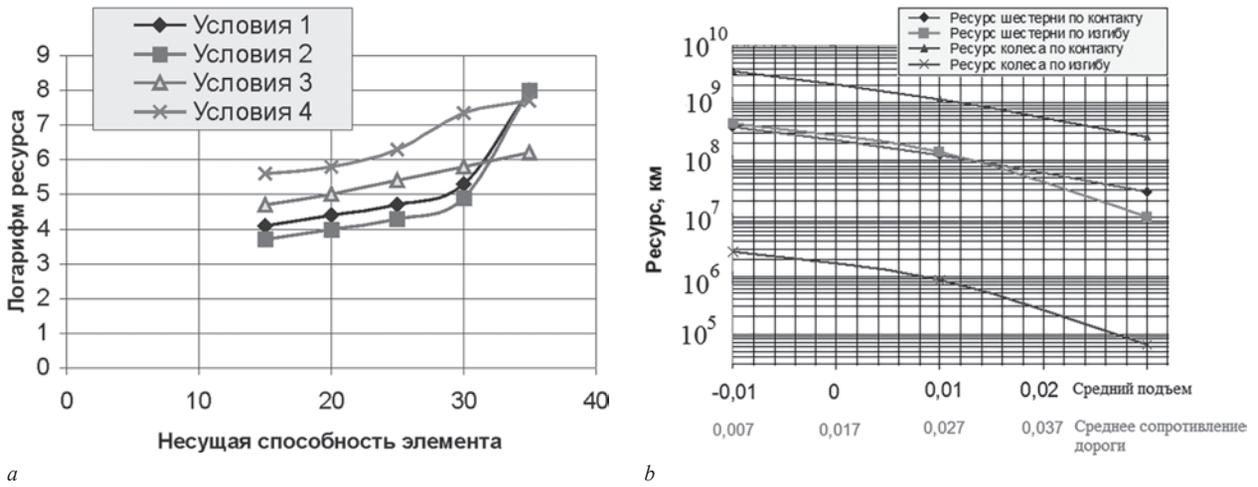


Рисунок 1 — РПК для четырех УЭ: *a* — внедорожные, городские, проселочные дороги, шоссе; *b* — аппроксиматор ресурса зубчатой передачи ведущего моста грузового автомобиля в городских условиях  
 Figure 1 — Lifetime-strength curves for four operating conditions: *a* — off-road, urban, country roads, highways; *b* — approximator of the gear drive lifetime of truck driving axle in urban conditions

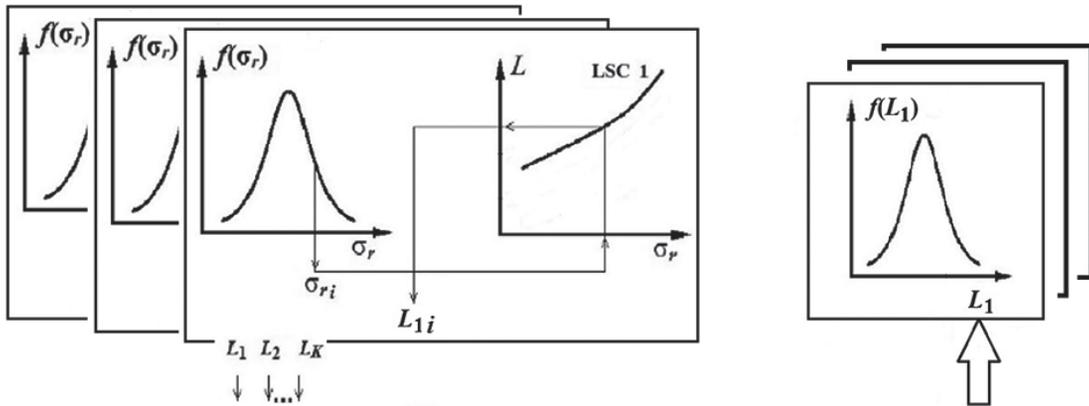


Рисунок 2 — Схема имитационного моделирования с использованием РПК, реализованная в компьютерной программе LSCurve  
 Figure 2 — Simulation modelling scheme using the lifetime-strength curves, implemented in a computer LSCurve program

- имитационного моделирования показателей несущей способности компонентов системы как случайных величин (СВ);
- определения ресурсов компонентов системы в зависимости от их несущей способности и РПК;
- имитационного моделирования и определения распределений ресурсов компонентов по схеме «несущая способность — ресурс» с использованием распределений их несущей способности и РПК как исходных данных.

*Общая процедура расчета надежности ТСИ.* Термин ТСИ введен в разработанном государственном стандарте СТБ 2465-2016 [6]. ТСИ — изделие, имеющее иерархическую структуру, большое число компонентов, в том числе различной физической природы, предназначенное для применения в варьируемых условиях и режимах эксплуатации. Примечания:

1. ТСИ могут включать механические, гидравлические, пневматические, электронные, электрические и другие компоненты.
2. Рабочий процесс ТСИ выполняется под управлением специально подготовленного оператора (водителя) либо системы автоматического управления.

3. Типовыми ТСИ являются мобильные машины, сельскохозяйственная техника, основное технологическое (промышленное) оборудование.

Общая процедура расчета ТСИ представлена в разработанном государственном стандарте СТБ 2466-2016 [7]. В ее основе лежит МСМН — многоуровневая схема «механика — надежность» (рисунок 3).

Общая процедура воспроизводит вероятностную природу УЭ и свойств компонентов, а также эффекты их зависимо поведения в системе. Для этого используется многоуровневое представление машины и моделирование методом Монте-Карло, в который встроены локальные процедуры, обеспечивающие зависимое поведение элементов и учет сложной логики предельных состояний ТСИ.

Низшие физические уровни (6, 5 и в ряде случаев 4, см. рисунок 3) содержат описания несущей способности элементов и их РПК, что позволяет реализовывать в расчетах зависимость по общим УЭ и другие зависимости элементов.

*Предварительными процедурами являются:* получение спектра относительной продолжительности условий эксплуатации (ОПУЭ) для вероятностной модели; построение РПК; выбор распределений

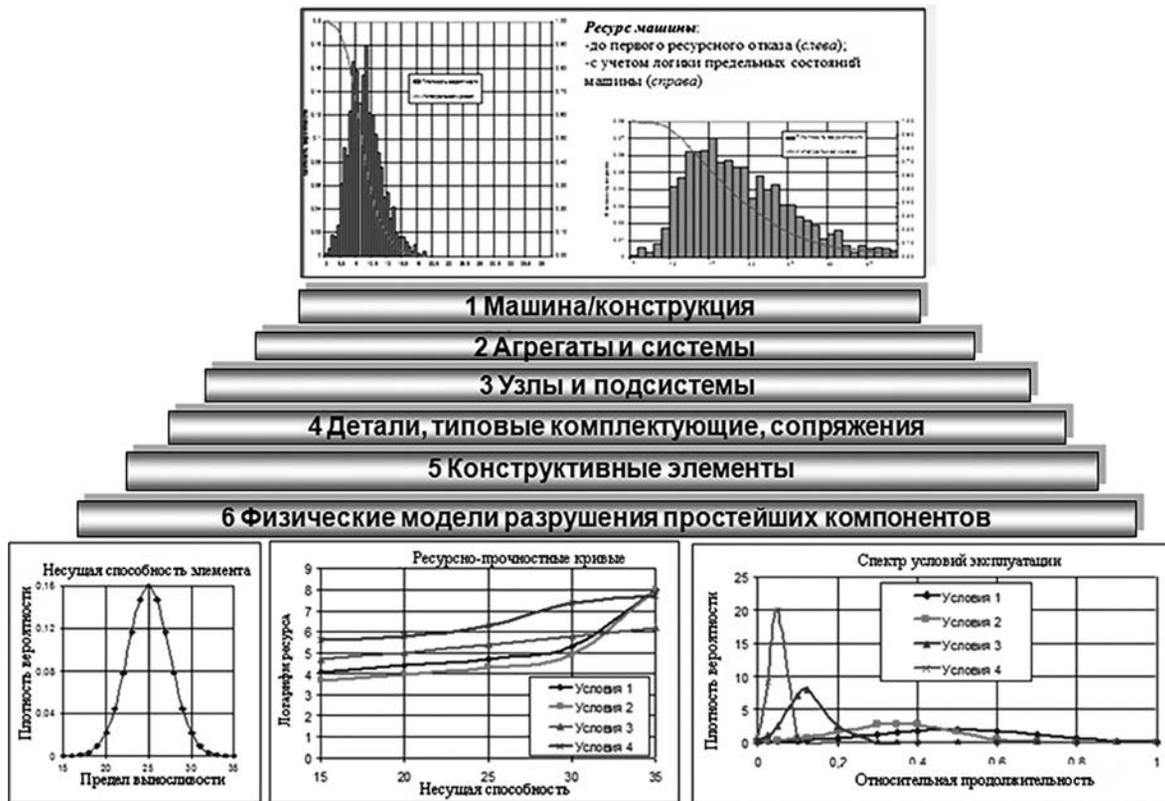


Рисунок 3 — Многоуровневая схема машины при оценке надежности в ресурсной механике машин  
 Figure 3 — Multilevel scheme of the machine at reliability assessment in lifetime mechanics of machines

характеристик несущей способности компонентов (если их поведение воспроизводится с нижних физических уровней) либо характеристик отказов элементов (при воспроизведении поведения отдельных компонентов со структурных уровней).

Еще одной особенностью является использование описания предельных состояний (отказов) машины *схемой предельных состояний (СПС)*. Она имеет более простой характер, чем давно разработанные блок-схемы надежности (Reliability Block Diagram, RBD) и деревья неисправностей или отказов (Fault Tree Analysis, FTA). Кроме того, СПС используется как локальная процедура определения ресурса ТСИ на каждом шаге моделирования методом Монте-Карло, т. е. она встроена в общую процедуру.

Для реализации процедуры расчета на верхних уровнях разработана компьютерная программа System Durability. Распределения ресурсов элементов описываются известными законами (нормальным, логарифмически нормальным, Вейбулла). Кроме того, предусмотрено использование закона произвольного вида, задаваемого гистограммой. В расширенной версии программы имеется возможность решения задач структурной теории надежности по определению вероятности безотказной работы системы, исходя из вероятностей отказов ее элементов и комбинаций схем их соединения (параллельных и последовательных). Такие задачи распространены в учебных курсах, когда вид распределений не важен и задаются только вероятности безотказной работы элементов.

**Диагностика привода.** Разработанные базовые принципы диагностирования привода и индивидуализации его информационной модели, начиная со стадии изготовления, представлены в [8]. К ним относятся:

- принцип необходимого разнообразия при выборе и установке датчиков;
- необходимость решения задач реконструкции данных;
- использование данных общего силового потока с его последующей локализацией для определения нагрузок конкретных компонентов;
- использование содержательных моделей при реконструкции нагрузок лимитирующих элементов для прогнозирования их предельных состояний (ПС).

В частности, была разработана диагностическая система редуктора мотор-колеса (РМК) карьерного самосвала БЕЛАЗ (рисунок 4). В качестве основного диагностического сигнала выбран виброимпульс, как отклик системы на ударный импульс, возникающий в результате взаимодействия зубьев зубчатых колес. Его параметры тесно связаны с техническим состоянием зубчатой передачи. Дополнительно регистрируется частота вращения вала редуктора.

Система диагностики обрабатывает диагностическую информацию и оценивает техническое состояние редуктора. Изменение амплитуды ударного импульса и виброускорения отражает изменение внутренней динамики системы и соответствующих показателей, что используется в прогнозирующих ресурсных расчетах. Мера повреждения зубчатых

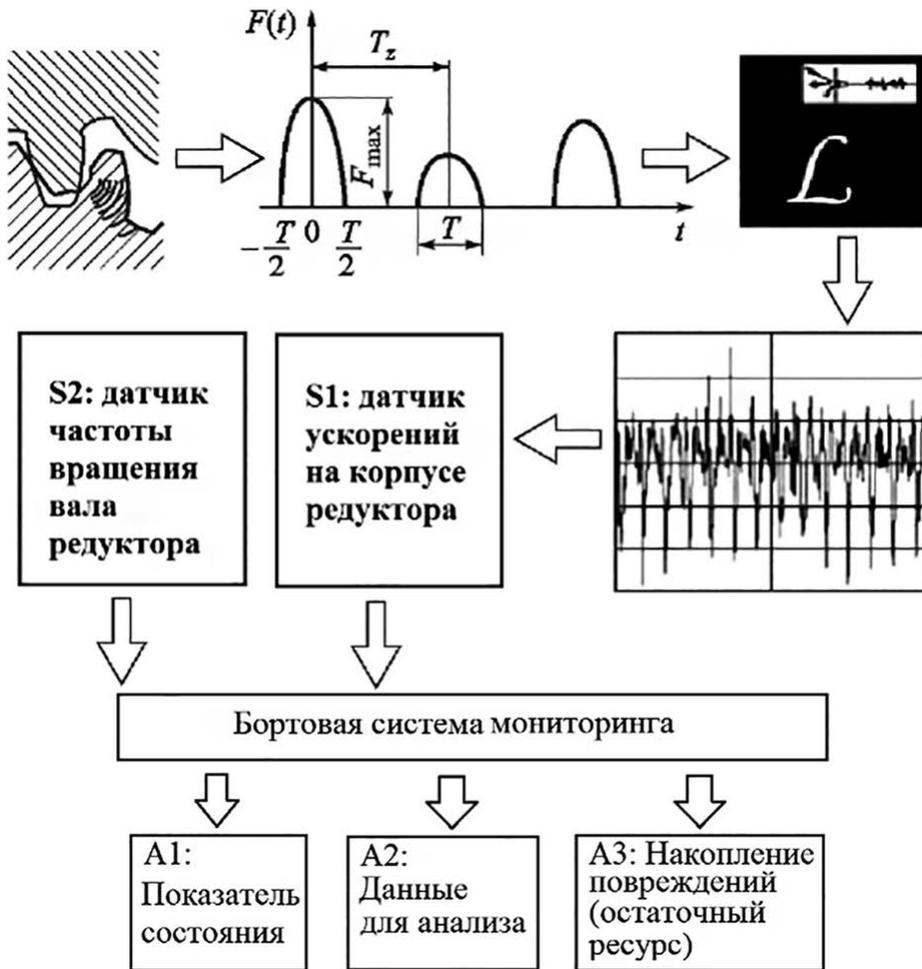
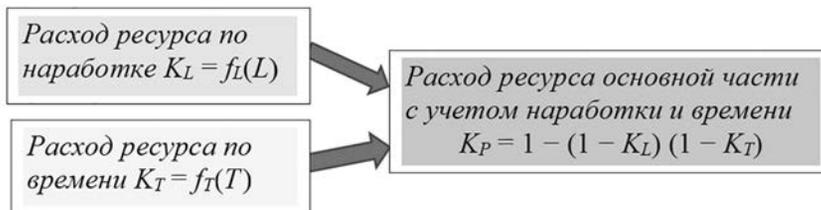


Рисунок 4 — Процессы в РМК и системе его мониторинга  
Figure 4 — Processes in the motor-wheel gearbox and its system monitoring

1. Расход ресурса основной части:



2. Вклад основной части в расход ресурса ТСИ

где коэффициент весомости  $\xi = m / m_0$ ;

$m$  – масса основной части, кг;

$m_0$  – общая масса основных частей ТСИ, кг

$$K_{PY} = \xi K_P$$

3. Расход ресурса ТСИ, содержащего  $n$  основных частей

$$K_A = \sum_{i=1}^n K_{PYi}$$

Расход ресурса  $K_P$  имеет смысл *вероятности ресурсного отказа под действием двух независимых факторов: наработки и времени*; при этом  $K_L$  соответствует вероятности отказа по наработке, а  $K_T$  – по времени.

Рисунок 5 — Процессы в РМК и системе его мониторинга  
Figure 5 — Processes in the motor-wheel gearbox and its system monitoring

колес редуктора определяется на каждом  $i$ -м интервале работы и по ее сумме оценивается остаточный ресурс за рассматриваемый период. Одновременно техническое состояние РМК контролируется ин-

тегрально, при этом отслеживается значение среднеквадратического значения (СКЗ) виброускорения, а цветовая индикация информирует водителя о текущем состоянии РМК.

Таблица — Расчет расхода ресурса автомобиля  
Table — Calculation of vehicle lifetime consumption

Основная часть	$K_L, \%$	$K_T, \%$	$K_P, \%$	$m, \text{кг}$	$K_{PP}, \%$	$K_A, \%$
Рама	23,10	68,12	75,48	456	12,09	61,68
Двигатель (КР)	6,17	31,95	43,39	490	7,47	
Коробка передач (КР)	6,70	32,86	44,83	100	1,57	
Раздаточная коробка (БУ)	27,70	47,96	62,38	120	2,63	
Передний мост	23,10	59,27	68,68	495	11,94	
Средний мост	23,10	59,27	68,68	432	10,42	
Задний мост (замена)	7,80	42,31	46,81	432	7,10	
Кабина	38,12	59,27	74,80	322	8,46	

Примечание: КР — после капремонта (при этом значение  $K_{P_i}$  увеличивают на 20 %); БУ — бывший в употреблении; общая масса  $m_0 = 2847 \text{ кг}$

По данному направлению разработан государственный стандарт СТБ 2579-2020 [9].

**Расход ресурса — новое понятие для оценки индивидуального состояния многокомпонентного изделия.** Термин «потребление ресурса» для отдельного компонента понятен, как и его дополнительный термин «остаточный ресурс». Оценка ресурсного состояния сложного объекта, состоящего из нескольких компонентов, неоднозначна. Кроме того, некоторые компоненты можно заменить или отремонтировать, и их ресурс сразу повышается. Чтобы устранить эту неопределенность, в разработанном государственном стандарте СТБ 2578-2020 [10] вводится термин «расход ресурса» ТСИ и соответствующий показатель, который отражает ресурсный потенциал изделия в целом с учетом показателей его основных частей. Расход ресурса основной части определяется с учетом двух факторов: наработки и времени эксплуатации.

Новые термины:

- *расход ресурса ТСИ* — снижение ресурсного потенциала ТСИ, выражаемое в процентах или относительных единицах, с учетом удельного расхода ресурса его основных частей;

- *основная часть ТСИ* — составная часть ТСИ, учитываемая при оценке расхода ресурса;

- *расход ресурса основной части ТСИ* — снижение ресурсного потенциала основной части, выражаемое в процентах или относительных единицах, от наработки и времени эксплуатации.

Основные этапы определения расхода ресурса ТСИ показаны на рисунке 5.

Расход ресурса  $K_P$  имеет смысл *вероятности ресурсного отказа под действием двух независимых факторов: наработки и времени*; при этом  $K_L$  соответствует вероятности отказа по наработке, а  $K_T$  — по времени. Важным также является показатель весомости вклада каждой составной части (вместо простого осреднения).

В таблице приведен расчет расхода ресурса автомобиля, стоящего на дежурстве и совершающего небольшие пробеги. Для таких случаев традиционные расчеты, основанные на данных по наработке, не пригодны.

Расчет расхода ресурса с учетом пробега и времени дает оценку, соответствующую реальности. Это позволяет оценивать индивидуальное состояние изделия в процессе его жизненного цикла, включая периоды длительного простоя.

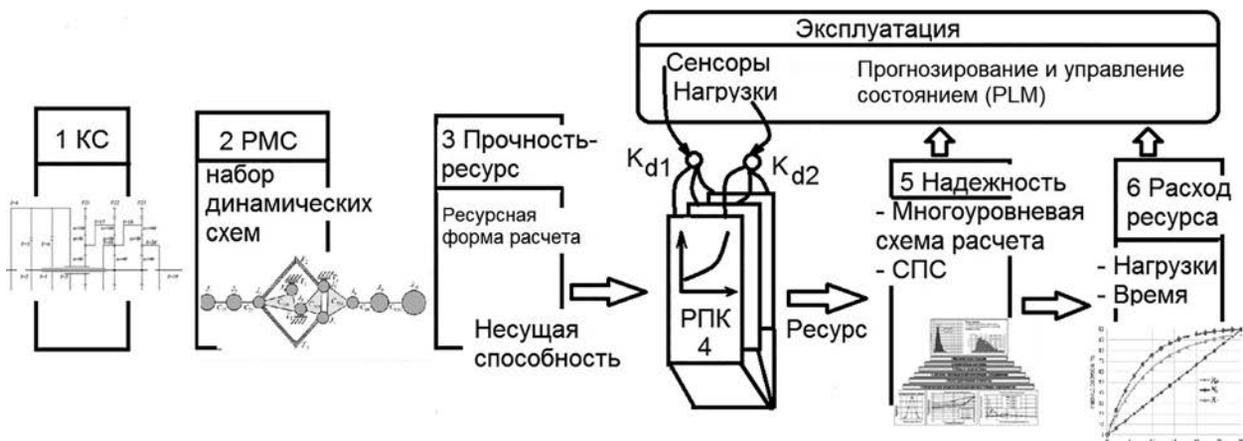


Рисунок 6 — Основные представления ТСИ и его информационная модель:

КС — кинематическая схема; РМС — регулярная механическая система

Figure 6 — Main representations of the technically complicated item and its information model:

КС — kinematic scheme; РМС — regular mechanical system

В подобных случаях обычные цифровые двойники, использующие показания датчиков, не имеют смысла.

**Прогнозирование и управление состоянием ТСИ.** На рисунке 6 показаны основные компоненты информационной модели ТСИ (применительно к приводу), сопровождающие его жизненный цикл.

Основные модели и расчеты, связанные с базовыми шаблонами-представлениями привода, должны *сопровождать жизненный цикл изделия*.

Расчеты деталей машин в соответствии с действующими нормативными документами выполняются с использованием коэффициентов безопасности, допускаемых напряжений и других «нересурсных» показателей. Поэтому для использования в информационной модели они должны быть *перестроены к ресурсному виду*.

Показатели динамического нагружения (коэффициенты динамичности) должны быть выведены на *верхний уровень ресурсных зависимостей* с возможностью корректировки по данным сенсоров в эксплуатации.

**Заключение.** 1. При разработке ТСИ принципиальным является создание *комплекса взаимосвязанных моделей в рамках единой информационной системы* для устойчивого отображения его жизненного цикла. Приоритет отдается физическим (фундаментальным) моделям, их использованию при разработке изделия и его эксплуатации с использованием данных сенсоров.

2. Разработанная *архитектоника ТСИ* содержит ряд новых представлений, моделей и инструментов, которые необходимо использовать для оценки функциональных и жизненных свойств ТСИ, и она применима к широкому кругу инженерных объектов.

3. *Модель расхода ресурса* следует применять в РНМ (Prognostics and Health Management) инженерных систем, она дает всестороннюю индивидуальную оценку жизненного потенциала объекта во время его эксплуатации при совместном действии *нагрузок* (механических, тепловых и т. д.) и *времени* (возраста).

4. Базовые содержательные *шаблоны-представления ТСИ* (кинематические схемы, набор динамических схем для различных типов динамических расчетов, СПС и т. д.) появляются в процессе разработки и проходят все стадии жизненного цикла изделия. Эти компоненты дополняются диагностикой ТСИ и оценкой ресурса и служат *накопителями новых знаний и данных* об изделии и условиях его эксплуатации.

5. Ресурсная механика машин (Lifetime Mechanics of Machines) обеспечивает *взаимосвязь моделей из различных дисциплин и методологий*, создание *информационной модели* как интегратора цифрового двойника и цифрового потока.

### Список литературы

1. ТОП-10 результатов деятельности ученых Национальной академии наук Беларуси за 2014–2020 годы в области фундаментальных и прикладных исследований: (научное издание) / науч. ред. А.И. Иванец; сост.: Н.М. Литвинко, С.С. Юрецкий. — Минск: Беларус. навука, 2021. — 75 с.
2. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с.
3. Расчет допустимой нагрузки для прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач. Часть 6. Расчет срока эксплуатации при переменной нагрузке: ISO 6336-6:2019. — Введ. 26.11.2019. — 44 с.
4. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
5. LSCurve: комп. программа: св-во о регистрации BY 1450 / В.Б. Альгин, В.М. Сорочан, М.А. Кононович, С.В. Ломоносов. — Опубл. 14.10.2021.
6. Надежность в технике. Менеджмент надежности технически сложных изделий: СТБ 2465-2016. — Введ. 01.06.2017. — Минск: Госстандарт, 2017. — 24 с.
7. Надежность в технике. Расчет надежности технически сложных изделий: СТБ 2466-2016. — Введ. 01.06.2017. — Минск: Госстандарт, 2017. — 20 с.
8. Альгин, В.Б. Надежность технически сложных изделий в свете «Индустрии 4.0» / В.Б. Альгин, Н.Н. Ишин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2017. — Вып. 6. — С. 43–54.
9. Надежность в технике. Вибрационный контроль состояния прямозубых передач приводов технически сложных изделий. Оценка остаточного ресурса: СТБ 2579-2020. — Введ. 01.03.2021. — Минск: Госстандарт, 2021. — 20 с.
10. Надежность в технике. Оценка расхода ресурса технически сложных изделий: СТБ 2578-2020. — Введ. 01.03.2021. — Минск: Госстандарт, 2021. — 20 с.

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General<sup>1</sup>

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

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

Deputy Chief of the R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

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

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

E-mail: nik\_ishin@mail.ru

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.  
 Head of the Laboratory "Mechanics of Composites and Biopolymers"<sup>2</sup>  
 E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 30 June 2021.

## INNOVATIVE DEVELOPMENTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS IN THE FIELD OF DRIVE MECHANICS. PART 2. LIFETIME MECHANICS OF MACHINES AND ARCHITECTONICS OF INFORMATION MODEL

*The article considers innovative developments in the field of drive mechanics of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus in cooperation with the V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus and other organizations. The main attention is paid to the results noted in the TOP-10 competition of the NAS of Belarus, in which the creative team of specialists of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus and the V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus became the winner, as well as the monograph "Gears and transmissions in Belarus: design, technology, evaluation of properties", which became a prize-winner in the All-Russian competition named after Ivan Fedorov with international participation in 2020 in the nomination for the best publication on research work. New results obtained by the authors in 2020–2021 on the subject under consideration are also presented. The article includes the provisions of the lifetime mechanics of machines developed at the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, including the definition of strength as a lifetime; ideas about the reliability of technically complicated items; description of the developed drive diagnostics system; the concept of lifetime consumption in the aspect of assessing the individual condition of a multicomponent item, as well as issues of forecasting and managing the condition of a technically complicated item.*

**Keywords:** *technically complicated item, lifetime mechanics of machines, strength, reliability, lifetime consumption, simulation modelling, drive diagnostics, information model, multicomponent item*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-5-12>

### References

1. TOP-10 rezultatov deyatelnosti uchenykh Natsionalnoy akademii nauk Belarusi za 2014–2020 gg. v oblasti fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy [TOP 10 results of the activity of scientists of the National Academy of Sciences of Belarus for 2014–2020 in the field of fundamental and applied research]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2021. 75 p. (in Russ.).
2. Algin V.B., et al. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovaniye, tekhnologiya, otsenka svoystv* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, evaluation of properties]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 406 p. (in Russ.).
3. ISO 6336-6:2019. *Raschet dopustimoy nagruzki dlya pryamozubykh i kosozubykh tsilindricheskikh zubchatykh peredach. Chast 6. Raschet sroka ekspluatatsii pri peremennoy nagruzke* [Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 6: Calculation of service life under variable load]. 2019. 44 p. (in Russ.).
4. Algin V.B. *Raschet mobilnoy tekhniki: kinematika, dinamika, resurs* [Calculation of mobile machinery: kinematics, dynamics, lifetime]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 271 p. (in Russ.).
5. Algin V.B., Sorochan V.M., Kononovich M.A., Lomonosov S.V. *LSCurve. Kompyuternaya programma* [LSCurve. Computer program]. Certificate BY, no. 1450, 2021 (in Russ.).
6. Standard of Belarus STB 2465-2016. *Nadezhnost v tekhnike. Menedzhment nadezhnosti tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy* [Reliability in technique. Reliability management of technically complicated items]. Minsk, Gosstandart Publ., 2017. 24 p. (in Russ.).
7. Standard of Belarus STB 2466-2016. *Nadezhnost v tekhnike. Raschet nadezhnosti tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy* [Reliability in technique. Reliability calculation of technically complicated items]. Minsk, Gosstandart Publ., 2017. 20 p. (in Russ.).
8. Algin V.B., Ishin N.N. *Nadezhnost tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy v svete "Industrii 4.0"* [Reliability of technically complicated items in terms of "Industry 4.0"]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2017, iss. 6, pp. 43–54 (in Russ.).
9. Standard of Belarus STB 2579-2020. *Nadezhnost v tekhnike. Vibratsionnyy kontrol sostoyaniya pryamozubykh peredach privodov tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy. Otsenka ostatochnogo resursa* [Reliability in technique. Vibration control of the condition of spur gear drives of technically complicated items. Evaluation of the remaining lifetime]. Minsk, Gosstandart Publ., 2021. 20 p. (in Russ.).
10. Standard of Belarus STB 2578-2020. *Nadezhnost v tekhnike. Otsenka raskhoda resursa tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy* [Reliability in technique. Evaluation of lifetime consumption of technically complicated items]. Minsk, Gosstandart Publ., 2021. 20 p. (in Russ.).