

УДК 62–235:[531.1+531.3]

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

М.А. КОНОНОВИЧ

ООО «Синезис», г. Минск, Республика Беларусь

С.Н. РОМАНЕНОК

Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

В.М. СОРОЧАН

ООО «Сабаба Лэбс», г. Минск, Республика Беларусь

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕСУРСНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ. ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ

*Рассмотрены характерные примеры проблемных ситуаций, связанных с неопределенностью при моделировании технически сложных изделий — автомобилей, тракторов и других подобных объектов, которые эксплуатируются в изменяющейся среде, состоят из многих разнородных нестандартных компонентов, управляются оператором. Представлены характерные решения и пути разрешения проблемных ситуаций. К ним относятся: 1) устранение ошибочных представлений сущности объекта; 2) решение проблемы изоморфизма; 3) рассмотрение поведения объекта с неизвестными свойствами в заданных (известных) условиях; 4) содержательное представление свойств объекта и его среды; 5) учет разнообразия методик расчета (моделирования). В случае неустранимой неопределенности целесообразно сформировать пространство решений в виде, удобном для рассмотрения и оценки степени риска заинтересованными лицами. Основные положения статьи иллюстрируются примерами из собственной практики авторов.*

**Ключевые слова:** технически сложное изделие, неопределенность, моделирование, условия эксплуатации, функциональные свойства, надежность, пространство решений

**Введение.** Научное исследование — это поиск закономерностей, которые формулируются с использованием интуитивно понятных базовых понятий/терминов. Базовые понятия строго не определяются, они вводятся, иначе создается замкнутый круг, когда понятия выражаются друг через друга. При этом сами базовые понятия всегда содержат неопределенность.

Простейшее определение неопределенности дается в [1]: неопределенность — отсутствие или недостаток определения или информации о чем-либо; неопределенность может проявляться в разных областях человеческой деятельности.

Подборка трактовок неопределенности приводится в [2]. Особое значение неопределенности придается в синергетике, где хаотическое поведение отдельных частей системы управляется параметрами порядка, что при описании системы дает огромное информационное сжатие [3].

Виды неопределенностей в поведении экономических систем приведены в таблице 1, отражающей результаты [4], с использованием данных [5, 6]. К технической сфере из этих видов неопределенности наиболее близки «3. Техническая» (как следствие растущего объема информации о технических объектах, особенно при их эксплуатации), «4. Стохастическая» (как результат проявления, например, прочностных свойств объекта) и «5. Состояния источников и факторов внешней среды».

Неопределенность порождает проблемную ситуацию и неуверенность в принятии решений. Один из путей снижения неопределенности — использование концепций Индустрии 4.0. Принципиально новыми в Индустрии 4.0 являются модельный подход и цифровой двойник (Digital Twin) изделия, в значительной степени развитые в меха-

нике, а также сенсорные базы, средства беспроводной передачи данных, диагностика и аналитика.

*Модельный подход* подразумевает создание и использование комплекса моделей, который сопровождает изделие в процессе всего жизненного цикла и включает понятие цифрового двойника. *Цифровой двойник изделия* — компьютерный образ, соответствующий реальному изделию. Он синхронно отражает все существенные изменения изделия-оригинала с момента его изготовления.

Эволюция понятий, которая привела к общепринятому в настоящее время термину «цифровой двойник», и его современная интерпретация, с позиции создателей термина, представлена в [7, 8]. Многие публикации посвящены анализу этого понятия и содержат различные определения в зависимости от точки зрения авторов этих публикаций на проблему. Ряд из них систематизирован в [9].

*Подход авторов* настоящей работы основывается на статье [10], в которой обоснована необходимость информационной модели (этот термин наиболее точно отражает сущность модельного подхода), предвосхищены многие положения концепции цифрового двойника, описывается методология создания и использования наукоемкой продукции на основе информационной модели машины на различных этапах жизненного цикла. Современная трактовка авторов к использованию информационной модели содержится в [11, 12]. Основная особенность цифрового двойника технического объекта (после его изготовления и сборки) — отображение индивидуального поведения и состояния объекта в конкретных условиях эксплуатации, для этого широко используется диагностирование на основе данных

Таблица 1 — Классификация видов неопределенностей в поведении экономических систем (на основе работ [4–6])

Вид неопределенности	Краткая характеристика неопределенности по предлагаемому признаку
1. Перспективная	Возникает вследствие того, исследуемый объект недостаточно изучен
2. Ретроспективная	Связана с отсутствием информации о поведении изучаемого объекта в прошлом (асимметрия событий в прошлом и будущем)
3. Техническая	Невозможность предсказания точных результатов принимаемых решений, нарастает по мере увеличения объема информации и научно-технического прогресса
4. Стохастическая	Выступает результатом проявлений вероятностного (стохастического) характера исследуемых процессов и явлений
5. Состояния источников и факторов внешней среды	Изменчивость условий и состояний сложной социально-экономической системы в процессе ее эволюции
6. Целенаправленного противодействия	Ситуация конкуренции (конфликта двух сторон или более), когда каждая сторона не имеет сведений или располагает неполной, неточной информацией о мотивах и характере поведения других сторон
7. Целей	Неоднозначность, а иногда и невозможностью выбора одной цели при принятии решения или построении оптимизационной модели
8. Условий	Недостаточность или полное отсутствие информации об условиях, в которых принимаются решения
9. Лингвистическая (смысловая)	Возникает при применении терминов, понятий, словосочетаний, недостаточно точно описанных с математической точки зрения. Необходим соответствующий учет лингвистической неопределенности как основного свойства таких систем
10. Действий	Связана с отсутствием однозначности при выборе решений

различных сенсоров. Однако использование сенсоров, установленных в машине, не является обязательным. Например, можно на основе изменяющегося описания внешней среды моделировать поведение и изменение состояния объекта.

Применение сенсоров позволяет уточнить состояние объекта по силовым и скоростным факторам, в некоторых случаях возможно непосредственное наблюдение за развитием повреждающего процесса (например за ростом трещины, величиной износа сопрягаемых деталей), но не снимает полностью проблему неопределенности оценки ресурса, поскольку несущая способность деталей машин имеет случайный характер даже при самом высоком и стабильном качестве их изготовления, кроме того для технически сложных изделий (ТСИ) характерны разнообразные отказы.

О неустранимой неопределенности при оценке ресурса говорится в работе [13], где предложенная методология продемонстрирована на примере прогнозирования роста трещины и включает количественную оценку неопределенности в диагностике, прогнозе и оптимизации с учетом как случайных, так и эпистемологических источников неопределенности.

Таким образом, цифровизация в определенной степени позволяет уменьшить неопределенность при моделировании поведения изделий, однако многие аспекты требуют изучения и систематизации для корректного моделирования особенно ТСИ. Дополнительной проблемой является представление результатов в виде, удобном для выбора и принятия решений заинтересованными лицами.

**Цель данной работы** — рассмотреть характерные примеры проблемных ситуаций, связанных с неопределенностью при моделировании ТСИ, обосновать подходы и методы разрешения указанных проблемных ситуаций.

**1. Примеры неопределенностей в жизненном цикле технических сложных изделий. 1.1. Разнообразие представлений.** Характерным примером является проблема изоморфизма, например при синтезе структуры трансмиссионных систем. Изоморфизм — множественность представлений одного и того же объекта, наделенного структурой.

*О термине «изоморфизм» [14].* Изоморфизм (от др.-греч. «равный, одинаковый, подобный» и «форма») — это общее понятие, которое определяется по-разному в различных разделах математики. Изоморфизм определяется для множеств, наделенных некоторой структурой (например, для групп, колец, линейных пространств и т. п.). В общем случае объекты, между которыми существует изоморфизм, являются «одинаково устроенными» в смысле этой структуры. Например, два графа называются изоморфными, если между ними существует изоморфизм, т. е. вершинам одного графа можно сопоставить вершины другого графа так, чтобы соединенным вершинам первого графа соответствовали соединенные вершины второго графа, и наоборот. Иными словами, два графа изоморфны, если они «одинаковы» с точностью до переименования вершин. Пример таких графов приведен на рисунке 1.

*Практическая проблема* — посторонние структуры планетарных коробок передач для последующего синтеза их схем.

*Основная идея.* Основная идея состоит в том, чтобы перенести проблему изоморфизма из «графовой» сферы в область построения матриц определенного вида. Предварительно описываются все варианты *распределения степеней звеньев*  $\deg V_i$  (т. е. числа вхождений каждого звена  $V_i$  в планетарные механизмы; звено может входить в один и в несколько механизмов). Как правило, таких вариантов немного.

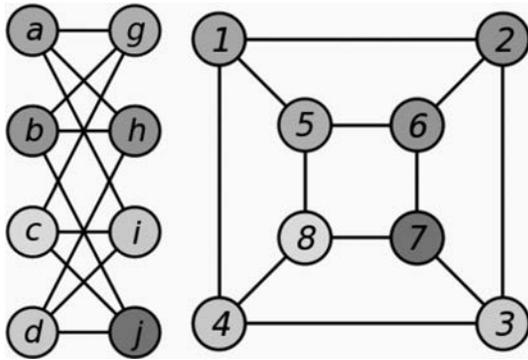


Рисунок 1 — Пример изоморфных графов [14]

При построении матрицы инцидентий используются следующие правила (условия) для получения только уникальных (без изоморфизма) вариантов:

- *существование и работоспособность механизма* (отсутствие блокировки и связность (целостность), кроме отдельных случаев, когда система представлена несколькими фрагментами; в этом случае осуществляется построение фрагментов, обладающих целостностью);
- *минимизация номеров* (звенья входят в механизмы с наименьшими номерами, т. е. использование в составе каждого, начиная с первого, механизма звеньев с возможно меньшими номерами);
- *разнообразие* (использование для каждого механизма всех различных вариантов выбора звеньев с различным статусом по  $deg V_j$ ).

Матрицы инцидентий, сформированные с учетом приведенных правил, названы *каноническими матрицами* [15, 16].

На рисунке 2 показаны матрицы А и В, описывающие структуру планетарного блока из 3 трехзвенных механизмов U1–U3 и 6 звеньев V1–V6.

Матрица В не является канонической, подобных матриц может быть построено несколько, и все они будут описывать ту же структуру, что и каноническая матрица, которая является уникальной, удовлетворяющей вышеприведенным правилам для определенного распределения связности звеньев. Обе приведенные матрицы описывают одну и ту же структуру (см. рисунок 2 в), по которой может быть синтезирована редукторная часть всемирно известной коробки передач World Transmission фирмы Allison (см. рисунок 2 з).

На рисунке 3 показаны примеры компьютерного построения канонических матриц [16, 17].

**1.2. Схематизация технических объектов для моделирования их динамики.** Ульф Гренандер в [18] отмечает: «Поиск регулярности — это доминирующая тема в попытках человечества понять окружающий мир. Любая попытка такого рода базируется на неявном или явном допущении о том, что явления природы и события искусственного мира, созданного человеком, подчиняются определенным законам, определяющим *упорядоченность и структуру*».

Ниже эта идея конкретизируется применительно к механическим многомассовым системам на примере трансмиссии.

Типичные ошибки при схематизации: 1) составление уравнений без расчетной механической системы; 2) произвольное соединение компонентов механических систем.

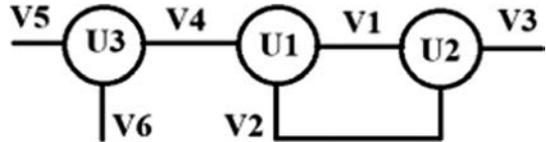
Прежде чем моделировать, необходимо перейти от объекта реального мира к его расчетной модели,

A	V1	V2	V3	V4	V5	V6
U1	1	1	1			
U2	1	1		1		
U3			1		1	1

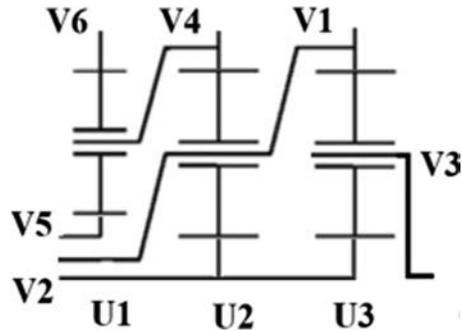
а

B	V1	V2	V3	V4	V5	V6
U1	1	1		1		
U2	1	1	1			
U3				1	1	1

б



в



з

Рисунок 2 — Каноническая матрица А (а) и некорректный вариант В (б), соответствующие матрицам структура (в) и планетарный блок World Transmission (з)

Variant 1	Variant 2	Variant 3
1 1 0 1 0 0 0	1 1 1 0 0 0 0	1 1 1 0 0 0 0
1 1 0 0 1 0 0	1 1 0 1 0 0 0	1 1 0 1 0 0 0
1 0 1 0 0 1 0	1 0 1 0 1 0 0	1 1 0 0 1 0 0
1 0 1 0 0 0 1	0 1 0 0 0 1 1	0 0 1 0 0 1 1

Рисунок 3 — Варианты компьютерного построения канонических матриц для четырех механизмов с различной связностью звеньев: слева (variant 1) 4-2-2-1-1-1-1, по центру и справа (variant 2 и 3) 3-3-2-1-1-1-1

включающей компоненты, идеализированные в рамках определенной научной дисциплины. Без такого перехода возможна ситуация, когда составленные уравнения могут не соответствовать ни одному объекту, рассматриваемому в данной научной дисциплине, а значит они бессодержательны. Это положение иллюстрирует рисунок 4, где запрещен переход к математической модели объекта без составления содержательной расчетной схемы с использованием положений, в нашем случае, механики.

Однако использование принятых идеализированных компонентов не является достаточным условием для корректного моделирования. Характерные примеры ошибок, которые возникают при произвольном соединении силовых, инерционных и упругих компонентов, проанализированы в [16, 20, 21, 22]. Отдельные примеры таких ошибок приведены на рисунке 5. Показано, что независимо от того, в каком программном пакете производится моделирование, происходит



Рисунок 4 — Основные процедуры схематизации объекта механики [19, 20]

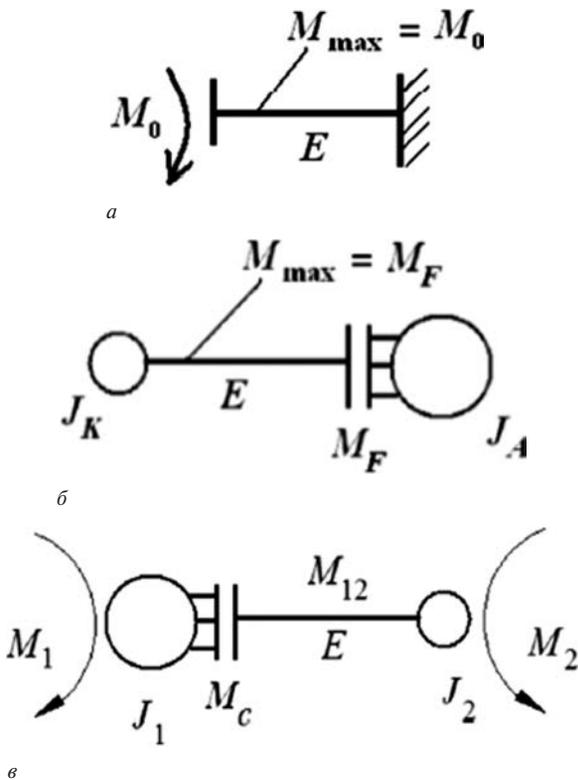


Рисунок 5 — Некорректные механические модели:

*a* — приложение момента к безмассовому упругому звену; модели с безмассовым трением, имитирующие ведущее колесо (*b*); *v* — сцепление

зависание программы из-за неопределенности в выборе параметров в ходе вычислений, хотя исходная схема объекта программой формируется, и программа приступает к динамическому расчету.

С учетом сказанного разработана методология, обеспечивающая корректную схематизацию и моделирова-

ние поведения механических объектов. Механические системы, которые предлагается использовать для схематизации объектов реального мира, необходимо формировать по определенным правилам и с определенными ограничениями, обусловленными использованием компьютера, как дискретного вычислительного устройства. Для этого разработана концепция регулярной механической системы, которая содержит ряд положений, одно из которых приведено ниже.

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

Непосредственная связь (не через массу) для устройств-соединителей запрещена. Силовые воздействия — только на массы. В этом состоит принцип регулярности рассматриваемых систем.

Общий вид регулярной механической системы показан на рисунке 6.

Другие положения концепции и примеры использования регулярной механической системы в практических расчетах динамики многомассовых систем

Основные звенья (сосредоточенные массы)

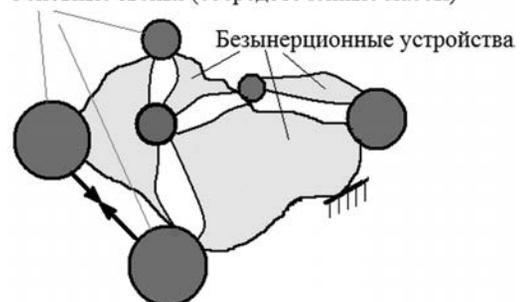


Рисунок 6 — Общий вид регулярной механической системы

(Multibody Dynamics), в том числе с переменной структурой, приведены в [16, 20–24].

**1.3. Вариация среды.** Проблема структурирования и отражения в расчетах нагрузочных режимов мобильных машин наиболее глубоко рассмотрена в работах научной школы И.С. Цитовича.

Известны предложения о применении в расчетах обобщенных данных, полученных «смешиванием» кривых распределения нагрузок по отдельным условиям (с учетом их долей) в общую кривую. Показано, что такие предложения ошибочны. Подход научной школы И.С. Цитовича состоит в том, что в расчетах необходимо учитывать *разнообразие нагрузочных режимов в виде вариации нагрузочных кривых и обобщенная кривая не может корректно заменять вариацию.*

Проведены многочисленные эксперименты, обобщены экспериментальные данные по нагрузочным режимам, получены характерные распределения нагрузок на полусях автомобилей. Для описания закономерностей нагружения использованы удельные тяговые усилия (удельные тяги). (Удельное тяговое усилие — отношение полного тягового усилия к полному весу машины). Построены типовые кривые удельных тяг  $P$  мобильных машин различных классов (рисунок 7 [25]).

В современных расчетах используется вариация условий эксплуатации в виде относительной продолжительности условий эксплуатации [20].

**1.4. Вариация продолжительности работы на отдельных режимах.** Еще одна характерная проблема имеет место при оценке продолжительности работы машины на отдельных режимах. Практическое значение — оценка относитель-

ной продолжительности (времени работы или пробега) на передачах при наличии ступенчатой трансмиссии.

Обычно относительное время работы распределяется по режимам (передачам), исходя из того, что его общая сумма равна единице. Такая методическая неточность особенно ощущается, когда машина имеет большое число передач. Отдельные передачи по времени оказываются недогруженными по сравнению с возможными реальными случаями эксплуатации машин в узких или специфических условиях. Этот факт известен специалистам-расчетчикам. Поэтому для таких так называемых рабочих передач устанавливают повышенное время работы. Однако такая операция основана на здравом смысле и методически ничем не подкреплена.

Сказанное иллюстрирует рисунок 8, где показано распределение времени работы на передачах трактора с многоступенчатой диапазонной трансмиссией. Для таких трансмиссией характерно перекрытие передач различных диапазонов. В зависимости от того, в каких условиях эксплуатируется мобильная машина, некоторые передачи могут использоваться гораздо чаще, чем при осредненном подходе.

В работе [26] эта проблема решается на основе «двойного» статистического моделирования, когда вначале воспроизводится относительное время работы машины в определенных условиях, а затем для сгенерированных условий определяется продолжительность работы на отдельных режимах передач. В результате для каждой передачи определяется кривая распределения параметра, его среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Используя эти данные, заинтересованное лицо может принять расчетное время, исходя из определенной вероятности. Иллюстративный пример полученных данных приведен в таблице 2 [26]. Видно, что сумма средних значений близка к единице.

**1.5. Вариация стиля вождения.** Стиль вождения в современных источниках оценивается в основном с позиций энергоэффективности. Вместе с тем, стиль вождения — один из наиболее значимых факторов при оценке нагрузки и ресурса.

Стиль вождения предложено оценивать *коэффициентом свободной тяги*  $k_{fc}$ . Это доля свободной тяги, ко-

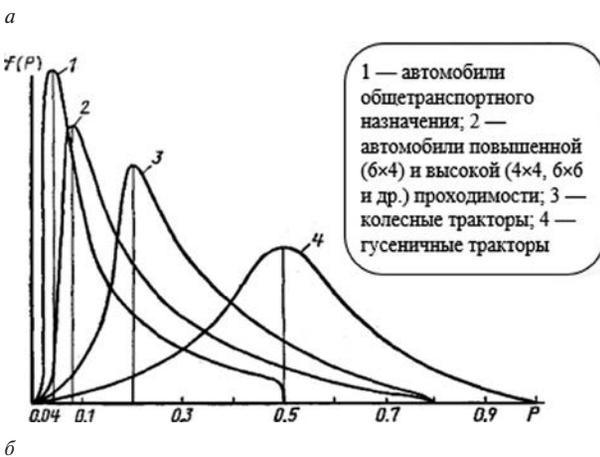
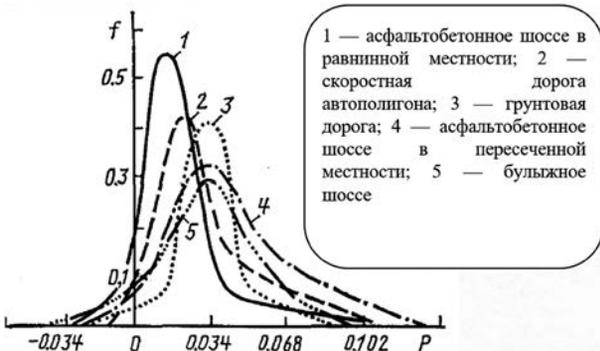


Рисунок 7 — Кривые распределения плотностей вероятности удельных тяговых усилий: автомобиля массой 33 т в различных условиях эксплуатации (а) и общие кривые различных типов мобильных машин (б)

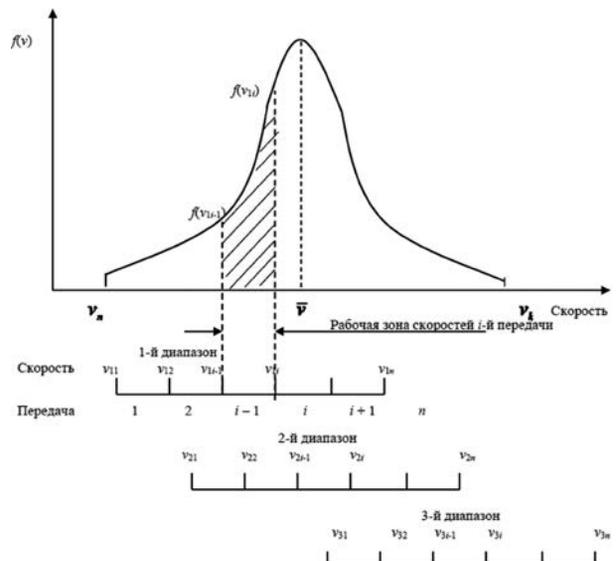


Рисунок 8 — К оценке относительной продолжительности работы на отдельных режимах

Таблица 2 — Продолжительность работы на передачах машин с 5-ступенчатой трансмиссией

Передача	Среднее относительное время работы на передаче по всем условиям	СКО относительного времени работы на передаче по всем условиям
I	0,12	0,0085
II	0,17	0,013
III	0,24	0,018
IV	0,27	0,020
V	0,19	0,014

торую водитель использует на разгон машины [16, 27], что иллюстрирует рисунок 9.

Таблица 3 иллюстрирует подход к распределению величин  $k_{fc}$  по передачам для трех выделенных стилей вождения на примере автомобиля SUV. Рисунок 10 демонстрирует значимость вкладов стиля вождения ( $k_{fc}$ ) и сопротивления качению (коэффициент  $f_0$ ). Видно, что изменение в стиле вождения приводит к 6–8-кратному разбросу ресурса, что гораздо более значимо, чем изменение сопротивления качению [20].

**1.6. Расчет надежности технически сложного изделия.**

Разработанные методы наиболее полно представлены в монографиях [16, 20] и отражены в государственных стандартах [28, 29], где дано содержательное определение ТСИ, что позволяет, в отличие от стандартов МЭК [30], сохранить значимость показателей долговечности для рассматриваемых видов техники (мобильные машины, станочное оборудование), а также корректно оценивать надежность, моделируя их как нагруженные механические системы. При этом в разработанных методах учитывается и воспроизводится вариация рассмотренных выше факторов: условий эксплуатации и несущей способности компонентов.

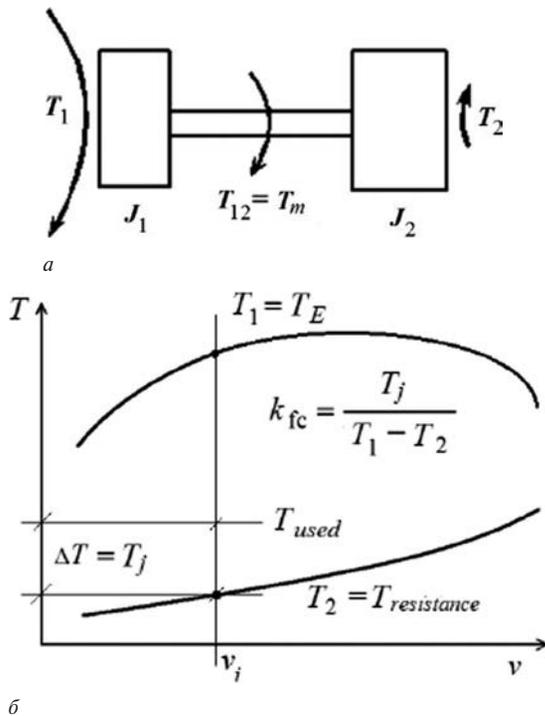


Рисунок 9 — Двухмассовая ( $J_1$ – $J_2$ ) схема машинного агрегата с приложенными моментами двигателя  $T_1$  и сопротивления  $T_2$  (а) и графическая интерпретация коэффициента свободной тяги  $k_{fc}$  (б)

Таблица 3 — Пример распределения  $k_{fc}$  по передачам автомобиля SUV

Стиль вождения	Передачи				
	1	2	3	4	5
Спокойный	0,25	0,145	0,092	0,061	0,05
Активный	0,5	0,290	0,183	0,122	0,1
Спортивный	0,75	0,619	0,552	0,514	0,5

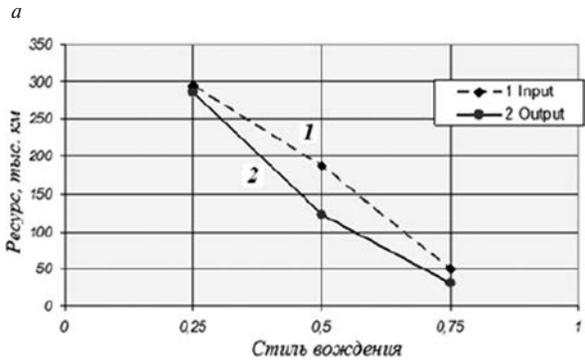
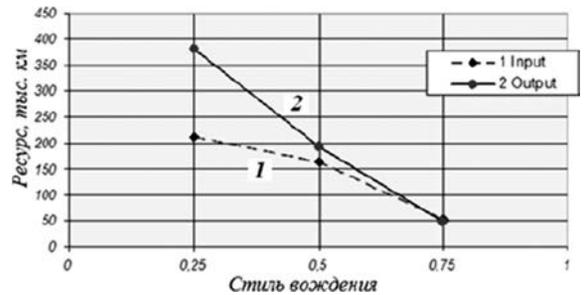


Рисунок 10 — Ресурс в условиях «Country» в зависимости от стиля вождения: а —  $f_0 = 0,025$ ; б —  $f_0 = 0,035$  (1 Input — мера повреждения компонентов на входе в коробку передач, 2 Output — на выходе)

**1.7. Отсутствие подробных данных о конструкции узла.**

Для современной техники характерна ситуация, когда поставщик какого-либо узла декларирует его свойства, но не дает подробных данных, необходимых для оценки его ресурса. Для оценки ресурсных свойств разработана методика сравнительной оценки [20, 31], основанная на использовании доступных данных. Основная идея — оценка меры повреждения узла при его установке на исследуемый автомобиль и автомобили-аналоги, использующие этот узел.

В таблице 4 показана оценка ресурса коробки передач ZF 6S–850R.6,72–0,79 в случае ее возможного использования на автомобиле МАЗ-447131. Данные по материалам деталей, конструктивным и технологическим особенностям деталей коробки отсутствуют.

Для простоты рассматривается одна характерная точка — выходной вал коробки передач (КП), и для нее рассчитывается одна мера повреждения (показатель кривой усталости для преобладающих процессов повреждения принят  $m = 3$ ), совокупно характеризующая ресурсы зубчатых колес и подшипников, нагруженность которых формируется за счет их вращения. Поэтому они имеют в значительной степени согласованные режимы нагружения и, соответственно, повреждения (на прямой передаче повреждения не учитываются, поскольку рассматриваемые детали на ней не нагружают-

Таблица 4 — Параметры исследуемого автомобиля и автомобилей-аналогов с КП ZF 6S–850R.6,72–0,79

Параметры	МАЗ-447131 (магистральный фургон)	DAF FAN LF55 21 t-LHD (магистральный фургон)	MAN TGL 8.180 7.5 Tonne 4 × 2 BB Tipper (самосвал)
Мощность двигателя, л/с (при частоте вращения вала, об/мин)	190 (2300)	220 (2500)	180 (2400)
Максимальный момент двигателя, Н·м (при частоте вращения вала, об/мин)	700 (1400)	820 (1200...1700)	700 (1400)
Полная масса, кг	19 450	24 500	18 700
Радиус колеса, м	0,38	0,45	0,38
Передаточное число главной передачи	3,90	4,56	4,11
Передаточные числа коробки передач $U_1 \div U_6$	6,72; 3,68; 2,15; 1,41; 1,0; 0,79		
Расчет меры повреждения КП			
Суммарная мера повреждения на км $\Sigma Q_{1n}, (Н \cdot м)^3 / км$	4,21 · 10 <sup>9</sup>	6,56 · 10 <sup>9</sup>	4,80 · 10 <sup>9</sup>
Относительная мера повреждения деталей на выходе коробки передач	100 %	156 %	114 %

ся). Автомобили-аналоги выбраны из условия, что в состав их трансмиссии входит КП ZF 6S–850R.6,72–0,79.

Мера повреждения КП на MAN несколько выше (на 14 %) с учетом того, что сама машина легче по сравнению с автомобилем МАЗ; условия эксплуатации ее более тяжелые, так как MAN TGL 8.180 7.5 Tonne 4 × 2 BB Tipper — самосвал. На автомобиле DAF мера повреждения КП значительно превышает (на 56 %) меру повреждения КП на автомобиле МАЗ из-за большей массы и более мощного двигателя автомобиля DAF.

С учетом того, что рассматриваемая мера повреждения обратно пропорциональна ресурсу, можно полагать, что и ресурсы КП на рассматриваемых автомобилях будут находиться в тех же обратных отношениях, а рассматриваемая КП пригодна для работы на автомобиле МАЗ.

**2. Индивидуализация. 2.1. Диагностика.** Один из путей преодоления неопределенности основан на мо-

ниторинге состояния изделия, которое отслеживается с момента его изготовления (рисунок 11) [11].

Подходы, основанные на диагностике технического состояния трансмиссии по изменению виброактивности ее зубчатых передач, рассмотрены в [11, 12, 32, 33].

Целесообразно применять вместе диагностические модели, непосредственно отражающие состояние объекта и прогностические модели, основанные на учете накопления повреждений и сопровождающие жизненный цикл ТСИ. Такая «двухкоординатная» оценка (две точки зрения) обеспечивает более высокую достоверность индивидуального прогноза ресурса.

Ниже приводится подход к индивидуализации технического состояния планера беспилотного летательного аппарата (БЛА) (рисунок 12).

В процессе полета сигналы от датчиков систем БЛА о параметрах его функционирования, параметрах внеш-

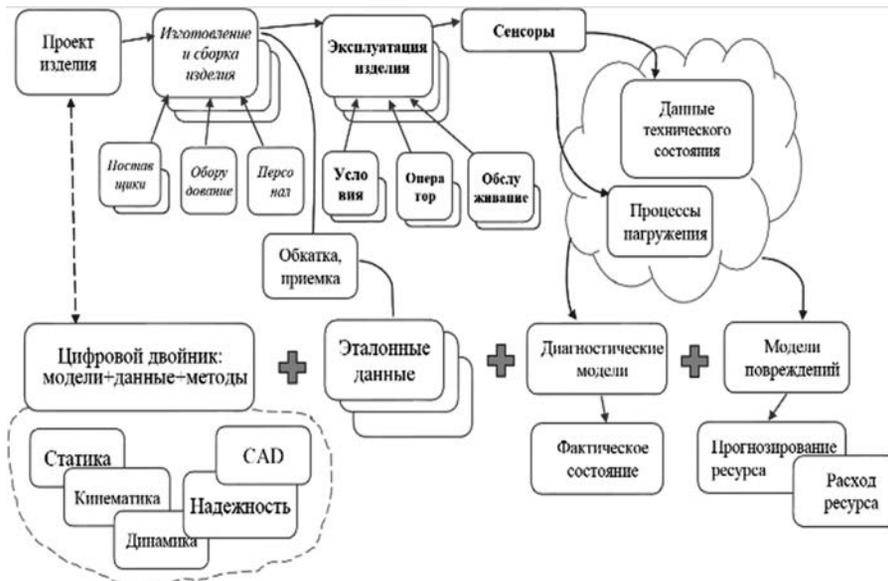


Рисунок 11 — Эволюция изделия и его информационной модели (цифрового двойника) в процессе жизненного цикла [11]



Рисунок 12 — Общая схема индивидуальной оценки технического состояния и прогноза ресурса БЛА

ней среды и управляющих воздействиях на БЛА фиксируются в виде временных реализаций их значений системами объективного контроля.

Таковыми системами, как правило, оборудованы все летательные аппараты (ЛА), включая БЛА. Данные объективного контроля подлежат обязательному периодическому анализу специализированным программным обеспечением с целью определения исправности изделий во время функционирования, полноты и правильности выполнения полетных заданий, наличия ошибок эксплуатирующего персонала. Кроме того, эти данные могут использоваться для прогнозирования технического состояния изделий.

Ввиду того, что в полете главным повреждающим фактором для конструкции планера БЛА является вертикальная перегрузка  $n_y$  в центре масс, то для определения технического состояния и прогнозирования индивидуального ресурса БЛА целесообразно использовать указанный параметр и продолжительность полета  $T_{\text{пол}}$ , которая характеризует длительность нахождения конструкции БЛА в данных условиях нагружения.

Из каждой записи полета выделяется временная реализация вертикальных перегрузок  $n_y$  и значение продолжительности полета  $T_{\text{пол}}$ .

Временные реализации значений  $n_y$  подвергаются обработке по методу «дождя», затем полученные асимметричные циклы с экстремумами  $n_{y \max}$  и  $n_{y \min}$  приводятся к эквивалентным отнулевым циклам по вносимому усталостному повреждению, далее определяется максимальное значение одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему блоку нагружения в соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений, после чего вычисляется долговечность рассматриваемого элемента за один цикл нагружения. Таким образом, определяется текущая мера повреждения конструкции, характеризующая ее техническое состояние, и на ее основе может быть осуществлено прогнозирование ресурса конструкции планера БЛА.

**2.2. Расход ресурса.** Используемое в теории надежности понятие остаточного ресурса не позволяет оценивать ресурсный потенциал ТСИ, состоящий из многих составных частей, у которых остаточные ресурсы, как правило, различны. В связи с этим вводится новое понятие: *расход ресурса ТСИ* — снижение ресурсного потенциала ТСИ, выражаемое в процентах или относительных единицах, с учетом удельного расхода ресурса

его основных частей. Соответствующий показатель расхода ресурса ТСИ определяется следующим образом:

$$K_A = \sum_{i=1}^N \xi_i K_{pi},$$

где  $K_{pi}$  — расход ресурса  $i$ -й основной части ТСИ;  $\xi_i$  — коэффициент весомости, определяющий вклад основной части в совокупный расход ресурса ТСИ.

В качестве коэффициента весомости  $\xi$  целесообразно принимать отношение  $m/m_0$ , где  $m$  — значение массы основной части, кг;  $m_0$  — значение общей массы основных частей ТСИ, кг. При этом предполагается, что более массивные составные части в большей степени определяют ресурсный потенциал изделия в целом. Под основной частью понимается составная часть ТСИ, учитываемая при оценке расхода ресурса. Основные части ТСИ определяются заинтересованной стороной (например, разработчиком, изготовителем, потребителем, заказчиком), руководствуясь принципом отнесения к ним ресурсопределяющих узлов и систем.

Еще одним принципиальным положением является определение ресурсного потенциала основной части в зависимости от наработки и времени по формуле

$$K_p = 1 - (1 - K_L)(1 - K_T),$$

где  $K_L$  — расход ресурса по пробегу;  $K_T$  — расход по возрасту (оба показателя в относительных единицах).

Значения  $K_L$  и  $K_T$  определяются при мониторинге/оценке технического состояния объекта. Обычно процессы, обуславливающие  $K_L$  и  $K_T$ , можно рассматривать как независимые. Тогда параметры формулы (2) можно интерпретировать следующим образом:  $K_L$  — вероятность отказа по наработке (под действием нагрузок в рабочем цикле);  $K_T$  — вероятность отказа по времени;  $K_p$  — вероятность отказа основной части объекта при совместном действии нагрузок и времени.

Введение фактора времени дополнительно к наработке является особенно важным для изделий, которые длительное время находятся в состоянии готовности, но при этом не используются по основному назначению (вооружение, военная и специальная техника, пожарная и другая техника для ликвидации чрезвычайных ситуаций). Процессы устаревания при этом имеют место и ведут к снижению ресурсного потенциала ТСИ.

На рисунке 13 показаны расход ресурса  $K_p$  при линейном законе  $K_L$  и экспоненциальном законе  $K_T$ . Предполагается, что 95 % расхода ресурса от времени

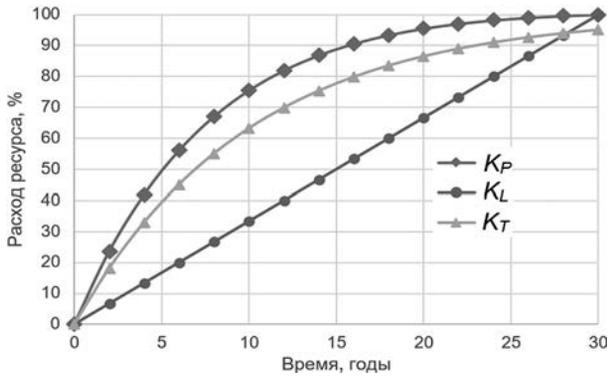


Рисунок 13 — Расход ресурса  $K_P$  при линейном  $K_L$  и экспоненциальном  $K_T$

приходится на 30 лет. Этот же период соответствует 100 % расхода по пробегу.

Другие примеры, в том числе расчеты реальных ТСИ и их составных частей, приведены в [16]. Показано, что даже при линейных  $K_L$  и  $K_T$  расход ресурса  $K_P$  имеет отчетливо выраженный нелинейный характер. Подготовлен государственный стандарт Республики Беларусь «Надежность в технике. Оценка расхода ресурса технически сложных изделий» [34].

**3. Характерные виды неопределенности. Методы/подходы к ее преодолению.** Обобщая вышеприведенные примеры, можно выделить виды неопределенности, которые порождаются следующими факторами:

- ошибочные представления (схематизация, неправомерное обобщение наблюдаемых вариативных данных: смешивание нагрузочных кривых в обобщенную);
- изоморфизм;
- недостаток данных об объекте;
- вариативность свойств объекта и его среды;
- разнообразие расчетных методик.

**Вариативность свойств.** Инструментами для преодоления неопределенности в данном случае (содержательная вариативность) являются: а) *цифровизация*; б) *обозримое представление пространства варьируемых параметров в виде, удобном для обозрения ответственных лицами, принимающими решения (ЛПР)*.

ЛПР — человек, наделенный полномочиями в той или иной сфере, несущий прямую ответственность за реализацию и последствия принятого решения. Следует отметить, что Инструкция по оценке условий труда при аттестации рабочих мест по условиям труда [35] предусматривает выделение в отдельный класс — «Восприятие сигналов (информации) и их оценка», в котором самые вредные условия труда (3-я степень) характеризуются следующим образом: «Восприятие сигналов с последующей комплексной оценкой связанных параметров». Кроме того, в Карте аттестации рабочего места по условиям труда предусматривается «Пункт 4. Результаты оценки напряженности трудового процесса», в котором имеется подпункт «4.3.1. Степень ответственности за результат собственной деятельности. Значимость ошибок».

Отсюда следует важность представления всего пространства возможных решений в форме, удобной для ответственных лиц, позволяющей учесть вероятностный характер проблемы и оценить риск принятия решения. Такой подход является альтернативой подходам, основанным на поиске оптимальных решений, при которых неизбежна жесткая фиксация ограничений на параметры, имеющие существенную вариацию в реальности.

Типовые формы представления пространства решений:

- 1) вероятностное представление одномерного показателя/критерия;
- 2) кластеризация (для небольшого числа взаимосвязанных показателей);
- 3) использование многомерного показателя/критерия (например, радарной диаграммы).

Пример применения первой формы описан в [36, 37], где дана методика определения и представления расхода энергии электробусом на маршруте в виде распределения энергопотребления на 1 км. Пример использования кластеризации приведен в [38, 39] применительно к оценке нагруженности фрикциона планетарной гидромеханической трансмиссии.

Применение радарной диаграммы для оценки планетарных коробок передач с учетом комплекса показателей представлено в [12, 20, 40]. При построении диаграммы использованы показатели: функциональности  $K_{FN}$ , диапазона  $K_D$ , энергоэффективности  $K_{EF}$ , компактности  $K_P$ , конструктивной сложности  $K_{SMP}$ , долговечности  $K_{DL}$ , которые всесторонне описывают основные свойства трансмиссии. Построение радарной сопровождается не только изображением «радара», но и общей количественной оценкой объекта в виде комплексного показателя качества  $K_Q$ , численно равного площади сформированного многоугольника (таблица 5).

По результатам оценки видно, что трансмиссия 9G-Tronic имеет самый высокий показатель качества и тем самым оправдывает репутацию лучшей мире многоступенчатой передачи с 4 степенями свободы. Этот результат в определенной степени подтверждает и корректность разработанной методики.

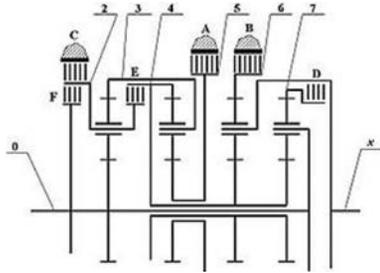
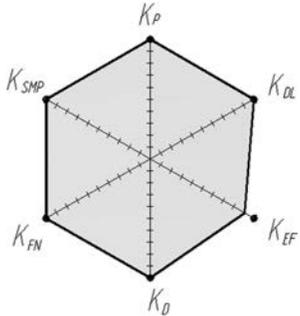
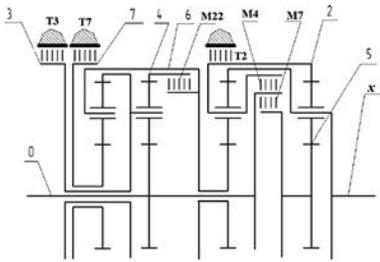
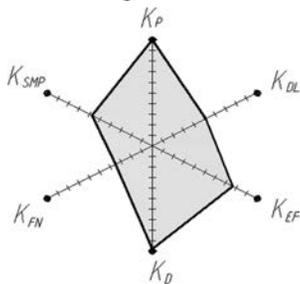
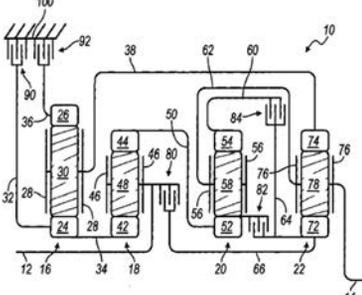
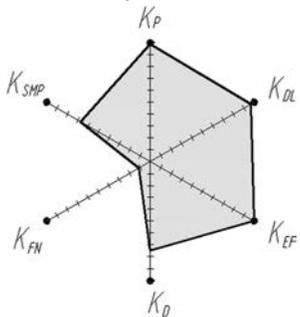
**Разнообразие расчетных методик.** Эта ситуация относится к эпистемологической неопределенности, когда имеют место различные подходы и методы моделирования одного и того же объекта или процесса. Так в работе [44] приводится описание 9 моделей многоциклового усталости для расчета компонентов механических систем, из которых 5 описывают линейный вариант, 3 — скорректированный, 1 — с учетом снижения предела выносливости. В подобных случаях может быть использован подход, основанный на применении радарной диаграммы для принятия решения с учетом всех рассматриваемых вариантов. Важным условием является приведение всех методик расчета (моделирования) к одинаковой форме представления результатов. В работе [44] для этого использована ресурсная форма для всех указанных вариантов, хотя многие из них в исходном виде оперировали действующими и допускаемыми напряжениями и другими не ресурсными показателями.

**Заключение.** Впервые системно рассмотрены неопределенности, связанные с жизненным циклом технически сложных изделий, проведена их типизация, представлены методы разрешения проблемных ситуаций, порождаемых неопределенностями.

Снижение неопределенности при моделировании может быть достигнуто за счет использования цифровизации (данные диагностики, распознавания).

В ряде случаев неопределенности имеют неустраняемый характер. В таких ситуациях целесообразно обозримое представление пространства решений для заинтересованных ответственных лиц.

Таблица 5 — Оценка известных многоступенчатых трансмиссий

Коробка передач	Передаточные числа	Комплексная оценка
1. Mercedes 9G-Tronic [41] 	5,503 3,333 2,315 1,661 1,211 1,0 0,865 0,717 0,601 -4,932	$K_{Q1}=2,52$ 
2. KATE [42] 	5,85 2,95 2,0 1,5 1,2 1,0 0,85 0,74 0,65 -5,7	$K_{Q2}=1,20$ 
3. General Motors [43] 	4,60 3,067 2,013 1,600 1,244 1,0 0,848 0,667 -3,653	$K_{Q3}=1,52$ 

## Список литературы

1. Неопределенность [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Неопределенность>. — Дата доступа: 20.08.2020.
2. Кравченко, А.И. Тезисы о неопределенности / А.И. Кравченко // UNIVERSITATES. Наука и просвещение. — 2014. — № 4. — С. 14–19.
3. Хакен, Г. Можем ли мы применять синергетику в науках о человеке? [Электронный ресурс] // Сайт С.П. Курдюмова. — Режим доступа: <http://spkurdyumov.ru/what/primenyat-sinergetiku-v-naukax-o-cheloveke-german-haken/>. — Дата доступа: 20.08.2020.
4. Авдийский, В.И. Неопределенность, изменчивость и противоречивость в задачах анализа рисков поведения экономических систем / В.И. Авдийский, В.М. Безденежных // Наука. — 2011. — № 3(66). — С. 45–61.
5. Солнцева, Г.Н. Определение неопределенности / Г.Н. Солнцева // Управление риском. — 1997. — № 2. — С. 23–24.
6. Тэпман, Л.Н. Риски в экономике / Л.Н. Тэпман. — М.: Юнити-Дана, 2002. — 280 с.
7. Grieves, M. Origins of the Digital Twin Concept / M. Grieves // Florida Institute of Technology / NASA. — 2016. — DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
8. Grieves, M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // ARC. — 2019. — DOI: <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>.
9. Barricelli, B.R. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications / B.R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — Pp. 167 653–167 671. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>.
10. Гринберг, А.С. Информационные модели и ресурсы машин / А.С. Гринберг, В.Б. Альгин // Механика машин на пороге III тысячелетия: мат-лы междунар. науч. конф., Минск, 23–24 нояб. 2000 г. — Минск: Белавтотракторостроение, 2001. — С. 272–281.
11. 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.]. — 2017. — Вып. 6. — С. 43–54.
12. Algin, V. Development of information model of power transmissions in the light of Industry 4.0 / V. Algin [et al.] // International Scientific Journal “MATHEMATICAL MODELING”. — 2020. — 4. — Pp. 54–63.
13. Digital twin approach for damage-tolerant mission planning under uncertainty / P.M. Karve [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. — 2019. — Vol. 225. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106766>.
14. Изоморфизм [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Изоморфизм>. — Дата доступа: 20.08.2020.
15. Альгин, В.Б. Алгоритм получения структур планетарных коробок передач / В.Б. Альгин // Разработка и применение методов и средств вычислительной техники для автоматизированной обработки информации. — Минск, 1974. — С. 63–64.

16. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
17. Алгоритмизация и программная реализация анализа и синтеза сложных трансмиссионных механических систем / А.А. Дюжев [и др.] // Инженерно-педагогическое образование: проблемы и пути развития: материалы междунар. науч.-практич. конф. в 2 ч. — Ч. 2 / Под общ. ред. С.Н. Анкуды. — Минск: МГВРК, 2013. — С. 41–43.
18. Гренандер, У. Лекции по теории образов: в 3 т. / У. Гренандер. — Т. 3: Регулярные структуры. — М.: Мир, 1983. — 432 с.
19. Схематизация и динамический расчет мобильной машины. Системы с переменной структурой / В.Б. Альгин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2008. — № 2(3). — С. 16–24.
20. Альгин, В.Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 549 с.
21. Альгин, В.Б. Схематизация и расчет мобильной машины как многомассовой системы. Регулярные механические системы / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 1(18). — С. 6–16.
22. Algin, V. From Newton's Mechanics to Dynamics of Regular Mechanical Systems with Variable States and Power Flows / V. Algin // Proc. of The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25–30, 2015. — Pp. 130–139. — DOI: <https://doi.org/10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS12.005>.
23. Algin, V. Kinematic and dynamic computation of vehicle transmission based on regular constructs / V. Algin, V. Ivanov // Proceedings of 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18–21, 2007 / Comité Français pour la Promotion de la Science des Mécanismes et des Machines; Edited by: Jean-Pierre Merlet and Marc Dahan — Besançon, 2007. — Paper A14. — 6 p.
24. Algin, V. Application of Regular Rotational and Translational Constructs to Vehicle Dynamics Problems / V. Algin, V. Ivanov // Proceedings of the 7th European Conference on Structural Dynamics, Edited by Michael J. Brennan, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Southampton, UK, 7–9 July 2008. — Paper E16. — 12 p.
25. Цитович, И.С. Надежность трансмиссий автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, Б.Е. Митин, В.А. Дзюнь. — Минск: Наука и техника, 1985. — 143 с.
26. Альгин, В.Б. Синтез нагрузочных режимов для проектных расчетов деталей и узлов мобильных машин / В.Б. Альгин, М.А. Кононович // Современные методы проектирования машин: респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 2. В 7 т. / Под общ. ред. П.А. Витязя. — Минск: УП «Технопринт», 2004. — Т. 4: Надежность и ресурсное проектирование машин. — С. 79–82.
27. 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.
28. Надежность в технике. Менеджмент надежности технически сложных изделий: СТБ 2465-2016 [Электронный ресурс]. — Введ. 01.06.2017 // ИПС «Стандарт». — Режим доступа: <https://ips3.belgiss.by>. — Дата доступа: 20.08.2020.
29. Надежность в технике. Расчет надежности технически сложных изделий: СТБ 2466-2016 [Электронный ресурс]. — Введ. 01.06.2017 // ИПС «Стандарт». — Режим доступа: <https://ips3.belgiss.by>. — Дата доступа: 20.08.2020.
30. IEC TC 56. DEPENDABILITY [Electronic resource] // IEC. — Mode of access: <https://tc56.iec.ch/>. — Date of access: 20.08.2020.
31. Альгин, В.Б. Сравнительная оценка ресурса узлов мобильной машины на основе нагрузочных режимов и мер повреждения в характерных точках ее механической системы / В.Б. Альгин, В.М. Сорочан // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 3(12). — С. 6–22.
32. Algin, V. Models and approaches in design and diagnostics of vehicles planetary transmissions / V. Algin, M. Ishin, S. Padubka // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 393 012042. — 2018. — Pp. 1–10.
33. Development of digital twins for gears and transmissions based on lifetime mechanics and composites mechanics / V.B. Algin [et al.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 172–184.
34. Надежность в технике. Оценка расхода ресурса технически сложных изделий: СТБ 2578-2020.
35. Инструкция по оценке условий труда при аттестации рабочих мест по условиям труда и предоставлению компенсаций по ее результатам: утв. Постановлением Мин-ва труда и соц. защиты Респ. Беларусь 22.02.2008 № 35.
36. Algin, V. Calculated Modes for Assessing Operation Properties and Dependability of Vehicles. In: Uhl T. (eds) Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC // Mechanisms and Machine Science. Springer, Cham. — 2019. — Vol. 73.
37. Algin, V. Justification of Calculated Cases for the Assessment of the Basic Properties of Land Vehicles / V. Algin // Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL) 22–26 September 2019. Hannover, Germany, Editors Michael Beer and Enrico Zio. — Pp. 3510–3517. — DOI: [https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3\\_0765-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3_0765-cd).
38. Белабенко, Д.С. Классификация и визуальное представление результатов оценки нагруженности трансмиссии в переходных процессах / Д.С. Белабенко, В.Б. Альгин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 60–63.
39. Белабенко, Д.С. Применение операции нормализации динамической схемы при моделировании переходного процесса гидромеханической планетарной трансмиссии / Д.С. Белабенко, В.Б. Альгин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2020. — Вып. 9. — С. 212–215.
40. Кузнецов, Е.В. Многокритериальная оценка многоступенчатых планетарных коробок передач / Е.В. Кузнецов, В.Б. Альгин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 237–244.
41. Dörr, C. The new automatic transmission 9G-TRONIC from Mercedes-Benz [Electronic resource] / C. Dörr, M. Homm, G. Indlekofer. — Mode of access: <https://mbworld.org/forums/attachments/c450-c43-amg/415394d1515975835-2017-c43-sedan-comes-dual-clutch-9g-tronic-paper.pdf>. — Date of access: 20.08.2020.
42. Гидромеханическая коробка передач: пат. RU № 2549344, 2015 / М.В. Нагайцев, М.М. Нагайцев, А.И. Тараторкин, С.А. Харитонов. — Оpubl. 27.04.2015.
43. Multi-Speed Transmission: Pat. US 7699741 / J. Hart, J. Borgerson, S. Wittkopp, A. Phillips, C. Carey, M. Raghavan. — Publ. date: 20.04.2010.
44. Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин. — Минск: Наука і тэхніка, 1995. — 256 с.

Algin V.B., Kananovich M.A., Romanyonok S.N., Sarachan U.M.

#### Uncertainty in modeling lifetime and functional properties of technically complicated items. Digitalization opportunities

The article considers typical examples of problem situations associated with uncertainty in modeling technically complicated items — cars, tractors and other similar objects that operate in a changing environment, consist of many heterogeneous non-standard components, are controlled by an operator. Typical solutions and ways of solving problem situations are presented. These include: 1) elimination of erroneous ideas about the object's essence; 2) solving the problem of isomorphism; 3) consideration of the behavior of an object with unknown properties under given (known) conditions; 4) a meaningful presentation of the properties of an object and its environment; 5) taking into account a variety in methods of calculation (simulation). In case of unavoidable uncertainty, it is advisable to create a decision space in a form that is convenient for stakeholders to consider and assess the degree of risk. The main provisions of the paper are illustrated with examples from the authors' own practice.

Поступила в редакцию 25.09.2020.