



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 681.3.06

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

РАСЧЕТ РЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН. ПОДХОДЫ РЕСУРСНОЙ МЕХАНИКИ

Традиционная теория надежности рассматривает системы, состоящие из физически обезличенных компонентов с набором показателей надежности. Механическая инженерия оперирует напряжениями в компонентах машины, в отдельных случаях их ресурсами. Зависимости компонентов, которые имеют место на механическом уровне, в традиционной теории надежности не воспроизводятся, что приводит к ошибочным результатам при расчете машины как системы. В статье с позиций ресурсной механики машин представлены новые подходы и методы расчета надежности машины, начиная с механических моделей и заканчивая структурными, с рассмотрением сложной логики предельных состояний компонентов (деталей, узлов, агрегатов и т.д.) и машины в целом. Выделены основные факторы, которые определяют зависимое поведение машинных компонентов. Классифицированы типовые зависимости. Предложен метод расчета для сильно связанных компонентов и универсальный метод, основанный на статистическом моделировании общих условий эксплуатации, процессов нагружения, повреждения и отказов компонентов и подсистем различных уровней и машины в целом. Такие подходы позволяют учесть реальное (зависимое) поведение компонентов, в частности, общие режимы нагружения, и корректно рассчитывать надежность машин

Ключевые слова: машина, надежность, расчет, система, нагруженные компоненты

Введение. Проблемные вопросы расчета машин и их компонентов в механике и теории надежности

Проблема равнопрочности. Идея создания равнопрочной машины, которая разрушалась бы одновременно по всем своим составляющим, достаточно долго привлекала к себе внимание теоретиков и практиков (конструкторов и технологов). Со временем стало понятно, что в машинах, компоненты которых создаются на основе различных материалов и технологий, подвергаются различным видам нагружения и разрушительным процессам, это неосуществимо. Основные причины — разнообразие и неопределенность условий и режимов эксплуатации, неустранимый разброс характеристик несущей способности компонентов. К тому же, проектировать все составные части машины на один и тот же ресурс нецелесообразно по экономическим соображениям.

Разнообразие расчетных методик. К проблеме равнопрочности имеет отношение проблема сопоставления результатов прочностных расчетов различных деталей машин. Специализация и углубление подходов привели к разнообразию методик, несопоставимых форме и представлению результатов. Так, в результате расчета зубчатых колес по ГОСТ 21354—87 (СТ СЭВ5744—86) сопоставляются действующие и допускаемые напряжения; при расчете подшипников качения по РД 37.001.010—83 определяется 90-процентный ресурс, выраженный в километрах пробега автомобиля; в расчетах ряда деталей машин фигурируют в качестве резуль-

тата коэффициенты запаса, хотя понятие «коэффициент запаса» не имеет смысла, поскольку все объекты, в конечном счете, всегда разрушаются, какой бы запас они не имели. Если поставить задачу спроектировать все детали автомобиля на один и тот же ресурс и подтвердить результаты проектирования расчетом, то реализовать такую задачу практически невозможно из-за указанного разнообразия методик.

О предельных состояниях (ПС). Алхимики в прошлом потратили много усилий на поиск философского камня, способного превращать любые металлы в золото. В механике аналогичную ситуацию напоминают попытки рассмотреть разные процессы разрушения механических систем с позиции единого, например, энергетического критерия. Подобный подход противоречит принципу необходимого разнообразия У.Р. Эшби, поскольку нивелирует разнообразие предельных состояний, которые присущи сотням различных компонентов реальных технических объектов.

Машине, как техническому объекту, можно обеспечить вечный ресурс, заменяя новыми те ее составные части, которые достигают предельных состояний. В реальной практике понятие ПС имеет договорной, декларативный характер. Заинтересованные стороны (производитель и потребитель, или один из них) устанавливают критерии, по которым признается достижение машиной ПС. Критерии ПС формируются не только для машины в целом, но и для ее составных частей. Все чаще потребитель требует от производителя техническое руководство (обычно

в электронной форме), где описываются возможные предельные состояния всех составных частей машины. Поэтому вопрос описаний предельных состояний становится все более актуальным и составляет основу взаимоотношений производителя и потребителя.

Анализ материалов по определению ресурса автомобильной, тракторной, строительно-дорожной, пожарной и других видов техники показывает, что само понятие ресурса до предельного состояния машины в них трактуется по-разному. При этом для квалификации факта истощения ресурса привлекаются разнообразные критерии: технические, экономические, физические и другие (таблица 1).

При описании предельного состояния машины и ее составных частей следует исходить из того, что возможны две ситуации. Первая — предельное состояние компонента приводит к предельному состоянию системы (подсистемы), в которую входит компонент. Во втором случае для квалификации ПС используется более сложная логика по сравнению с определением ресурса объекта по наиболее слабой его составной части.

Предельное состояние машины (составной части) необходимо отличать от случая прекращения ее эксплуатации. Предельные состояния машины декларирует производитель, например, в технических условиях. Кроме того, известны случаи принятия таких критериев на уровне государственных стандартов (СССР). Наиболее естественным является подход, когда предельное состояние машины описывается на основе технических критериев, т.е. через предельные состояния агрегатов, последних — через предельные состоя-

Таблица 1 — Примеры предельных состояний механических объектов

Объект	Предельные состояния (ПС)
Деталь	Трещина, поломка, повреждение поверхности, потеря упругости, изменение формы
Сопряжение	Повышенный зазор в паре сопрягаемых деталей
Конструкция	Потеря устойчивости, нарушение формы стержневой или каркасной конструкции
Узел, агрегат, машина	Описание предельного состояния на основе признаков ПС составных частей (в случае технических критериев)
Автомобиль	ПС рамы и кабины (технический критерий)
Трактор	ПС двигателя, основного агрегата и дополнительного агрегата (технический критерий)
Строительно-дорожная техника	Затраты на капитальный ремонт (экономический критерий)
Пожарная техника	Регламентируются гамма-процентные ресурсы агрегатов. Срок службы до списания машины - в соответствии с нормами амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства (нормативные требования)

ния узлов, а их, в свою очередь, — через детали. Предельные состояния детали с ресурсной точки зрения должны быть описаны через ПС ее конструктивных элементов. Эти критерии физически проверяемы и объективны. Решение о прекращении эксплуатации принимает потребитель. Для принятия решения о прекращении эксплуатации машины он может использовать любые соображения: технические, экономические, нравственные и т.д.

Классификация предельных состояний и расчетов ресурса. Расчеты ресурса и предельные состояния, можно классифицировать по критериям, которым они соответствуют, и выделить следующие случаи: 1) одномерные простые, 2) одномерные комплексные и 3) многомерные ПС.

Первый случай соответствует одному предельному состоянию, которое вызвано действием одного нагружающего фактора. Второй — одному ПС, которое обусловлено действием нескольких нагружающих факторов (повреждающих процессов). Третий случай характерен для рассмотрения машины и ее составных частей как систем со многими ПС. В этом случае в расчете на заключительных стадиях применяются методы традиционной (структурной) теории надежности, и необходимо оперировать сложной логикой ПС.

Основы разработки и расчета механических объектов. При разработке и расчете механических объектов принципиальное значение имеет использование следующих данных и методов работы с ними:

- предельные состояния объекта и его компонентов;
- условия эксплуатации;
- свойства материалов и компонентов;
- вероятностное описание состояния объектов, условий эксплуатации, свойств материалов и компонентов.

Вероятностный подход обусловлен разнообразным применением объектов (условиями эксплуатации, действиями водителя) и природой их прочностных свойств (таблица 2).

Развитие методологии расчетов привело к введению вероятностного описания объектов для прочностных (ресурсных) моделей, как наиболее точно отражающих действительность, и узаконила вероятностные показатели — показатели надежности.

Основная формула теории надежности и ее ограниченность применительно к механическим системам. Теория надежности сформировалась в результате рассмотрения проблемы: почему система, состоящая из многих надежных элементов, в целом является ненадежной? Ее основная формула имеет вид:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t). \quad (1)$$

Таблица 2 — Факторы, определяющие вероятностный характер свойств машин

Фактор	Характер действия
1. Условия эксплуатации	Вероятностный (на множестве составных частей (элементов) объектов)
2. Несущая способность составных частей (элементов)	
3. Качество сборки машины	
4. Загрузка машины	Логико-вероятностный (в пространстве, времени и на группе объектов)
5. Действия оператора (водителя)	
6. Техническое обслуживание (состояние)	

Она позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы (ВБР) системы $P(t)$ как произведение вероятностей безотказной работы P_i ее N элементов в предположении их независимости. Однако эта формула приводит к некорректным результатам при ее применении к механическим системам, особенно, состоящим из многих элементов.

Теоретически, любую механическую систему можно представить сколь угодно большим числом последовательно соединенных элементов. В этом случае ее *расчетная надежность* будет стремиться к нулю. Очевидно, что для механических систем *реальная надежность* может быть низкой, но не нулевой, и подобная ситуация не соответствует действительности. Это объясняется тем, что элементы механической системы нельзя полагать независимыми. Их отказы/предельные состояния связаны друг с другом, определяются действием общих факторов.

Разрыв между расчетами механики и теории надежности. Теория надежности получила широкое применение при расчетах электрических и электронных систем, которые, как правило, представлены стандартными компонентами с известными характеристиками надежности. Однако эти подходы не в полной мере применимы к механическим системам.

Первое отличие механических от электронных и электрических систем состоит в нестандартном виде и поведении механических компонентов. Оно обусловлено следующими причинами [1]: при проектировании механических систем большинство элементов, составляющих систему, проектируют и изготавливают только и именно для этой системы; характеристики надежности элементов заранее не известны; для вновь проектируемых механических систем почти каждый элемент (вал, зубчатое колесо, диск трения и т.д.) изготавливают по индивидуальному конструктивному оформлению; при этом, каждый элемент отличается множеством признаков (конфигурацией, размерами, прочностными характеристиками); каждая деталь механической конструкции не является элементом конечной сложности, так как отказы даже достаточно простых деталей происходят из-за отказов различных элементов этих деталей; для вновь проектируемой механической системы нельзя с достаточной определенностью рассчитать количественные показатели надежности, пока не будет известно конструктивное оформление ее элементов.

На различие процессов деградации электрических (дрейф характеристик) и механических компонентов (разрушение) указывается в [2]: «Mechanical parts wear due to corrosion, friction, and other mechanical stresses. Electrical components do not wear in the same manner, and so preparing for wear in the design phase is very different. Electrical components experience drift, which the designer must make design accommodations».

Оценку надежности на стадии проектирования в [1] предлагается проводить путем расчетов элементов с учетом вероятностных распределений внешних нагрузок и несущей способности элемента. Полученные значения показателей надежности в дальнейшем использовать для прогнозирования надежности системы методами схемной надежности. При этом учитываются связи элементов в структурно-логической схеме. Под связями понимается информация об установке (последовательной либо параллельной) элемента в соответствующей подсистеме. Таким образом, предполагается, что для определения показателей надежности системы достаточно знания об уровнях надежности элементов и наличия структурно-логической схемы соединения элементов.

В [2] и других работах полагают, что оценка надежности системы — это область традиционной теории надежности, основанной на построении блок-схем, содержащих последовательные и параллельные фрагменты: «The math behind calculating reliabilities is the same. Furthermore, techniques, including parallel and serial reliability are fully explained».

Для большинства сборочных единиц (СЕ) машин, которые представляют собой нерезервированные системы, структурно-логическая схема сводится к цепи последовательно связанных элементов, а надежность системы в рамках традиционной (системной, структурной, схемной) надежности рассчитывается путем перемножения вероятностей безотказной работы элементов в предположении о независимости их отказов.

В системных расчетах используют показатели надежности компонентов как исходную информацию [3]. Однако проблема состоит в том, чтобы получить данные о надежности электрических и механических компонентов. Эти показатели обычно принимают по данным эксплуатации аналогов [4]. Для механических компонентов такая практика некорректна. Один и тот же типовой механический компонент (например, подшипник) имеет различные условия работы в различных машинах и механизмах. Из-за этого его надежность может быть различной.

Вторая важная особенность расчета механических систем — это учет зависимостей между компонентами. Зависимости механических компонентов классифицированы в [5]. Выделены четыре типа зависимостей: 1) начальных параметров несущей способности; 2) общей нагруженности элементов, работающих в общем режиме; 3) нагруженности и несущей способности; 4) состояний элементов. Показаны пути учета этих зависимостей в расчетах механических систем.

В статье [6] упоминается о том, что зависимости могут быть классифицированы на три типа: «These different types of dependence can be classified into common-mode failure, the load-sharing case and the so-called functional dependence (Neher, 2001)».

Зависимости компонентов в рамках традиционной (математической, структурной) теории надежности могут быть реализованы только путем учета корреляции между их отказами [7]. Однако проблема состоит в получении корреляционных зависимостей. Эти зависимости отличаются в разных системах, условиях и режимах их работы. Они не могут быть получены в рамках традиционной теории надежности.

В работе [8] констатируется разобщение структурных и инженерных (механических, физических) подходов. Первые названы «system without physics», а вторые — «physical without system». Одна из проблем корректного интегрированного расчета заключается в вероятностном характере исходных данных об условиях эксплуатации машин и характеристиках несущей способности компонентов.

В статье [8] указанный аспект трактуется как неопределенность исходной информации. Используется метод Монте-Карло для того, чтобы случайно выбранные физические переменные, определяющие отказы физических компонентов, «пропустить» через дерево отказов системы со сложной логикой и определить возможные последствия. Однако проблема описания и воспроизведения в расчете физических зависимостей компонентов в явном виде не рассматривается и не решается.

Таким образом, между инженерными расчетами компонентов машин и расчетами традиционной теории надежности существует разрыв. Отсутствуют подходы, позволяющие интегрировать элементы расчета механических

компонентов в процесс расчета надежности системы. Получение данных о надежности элементов в качестве необходимого промежуточного результата разрывает процедуру расчета надежности системы. В этом случае теряется информация о связях элементов, и приходится предполагать их независимость. Кроме того, результаты, получаемые в механике при расчете различных компонентов по разным методикам, сложно использовать как согласованную исходную информацию для моделей традиционной (структурной) теории надежности.

Качественная оценка и количественный учет зависимо-го поведения элементов технических систем. В работе [9] указывается, что расчет надежности изделий машиностроения по последовательной схеме без учета взаимного влияния элементов друг на друга дает результат значительно ниже практически наблюдаемого.

В работе [10] рассматриваются четыре типа зависимости элементов, из которых у механических систем имеют место зависимость начальных параметров и зависимость элементов, работающих в общем режиме. Первая отражает коррелированность параметров несущей способности элементов в рамках партии деталей, поскольку они изготавливаются в одном технологическом цикле.

При рассмотрении второй зависимости под режимом $\varepsilon = \varepsilon(t)$ понимается случайный процесс, от которого зависит ВБР элементов. Функция ВБР системы из N элементов:

$$P(t) = \int_{\Omega} \prod_{i=1}^N P_i(t | \varepsilon) P\{d\varepsilon\}, \quad (2)$$

где $P_i(t|\varepsilon)$ — условная ВБР элемента при условии, что режим $\varepsilon(t)$ фиксирован; $P\{d\varepsilon\}$ — вероятностная мера на траекториях движения. Если при изменении режима надежность всех элементов или уменьшается, или увеличивается, то:

$$P(t) \geq \prod_{i=1}^N P_i(t); \quad (3)$$

т.е. при расчете ВБР в предположении независимости отказов элементов, получается заниженное значение [10].

В работе [11] на основании исследований надежности редукторов предлагается ВБР редуктора определять с учетом корреляционных связей между отказами элементов по формуле:

$$P(t) \cong 0,86 \prod_{i=1}^N P_i(t) + 0,14. \quad (4)$$

При этом в произведение вероятностей входят ВБР всех элементов, кроме манжет (их рекомендуется не учитывать). Такая зависимость дает более высокое значение ВБР по сравнению со случаем простого перемножения вероятностей по формуле (1), что иллюстрирует рисунок 1.

Из рисунка 1 видно, что даже при высоких значениях ВБР элементов (0,95) надежность системы, состоящей из сравнительно небольшого числа ($N=10$) элементов существенно ниже (на 25—30 %), чем надежность каждого из элементов. Это отличие тем больше, чем ниже надежность элементов. С ростом числа элементов отличие также увеличивается.

В работе [12] отмечается, что между элементами сборочных единиц имеется корреляционная связь. В частности, элементы трансмиссии коррелированы через крутящий момент двигателя. Для системы из двух равнонадежных элементов приводится формула:

$$P = P_E^2 + r P_E (1 - P_E), \quad (5)$$

где P_E — ВБР элемента, r — коэффициент корреляции:

$$r = 1 / [(S_R / S_Q)^2 + 1]. \quad (6)$$

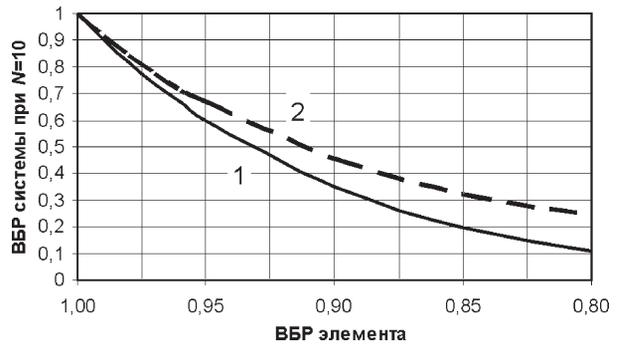


Рисунок 1 — Расчет вероятности безотказной работы системы из $N=10$ равнонадежных элементов: 1 — формула (1); 2 — формула Снесарева (4)

Здесь S_R и S_Q — средние квадратические отклонения несущей способности и нагрузки. При уменьшении S_R/S_Q , что достигается за счет снижения S_R путем стабилизации изготовления элементов, можно получить значения r , близкие к единице, и обеспечить высокую надежность сложного объекта, состоящего из большого числа элементов.

В работе [13] выделяется случаи, когда элементы, объединение в систему, могут быть зависимыми по коэффициенту корреляции и по отказу конструктивных элементов. Последнее наблюдается, когда при отказе элемента нагрузка перераспределяется на оставшиеся элементы. Этот тип не характерен для нерезервированных машиностроительных систем, у которых отказ любого из нагруженных элементов означает отказ системы.

Зависимость по коэффициенту корреляции возможна, когда в композиционные случайные функции (композиционные случайные величины) и первого и второго элемента входят одни и те же случайные процессы (величины), например внешние нагрузки. При этом под композиционной случайной функцией понимается:

$$Y(t) = R(t) - Q(t), \quad (7)$$

где $R(t)$, $Q(t)$ — случайные процессы, описывающие соответственно несущую способность и нагрузку. В качестве примера рассматривается система из двух элементов с надежностью (ВБР), равной $P_1 = P_2 = 0,5$ и коэффициентом корреляции $r_{112} = 1$, что может соответствовать нормальному закону распределения действующей нагрузки и детерминированной несущей способности элемента. Надежность системы определяется по формуле из работы [14]:

$$P = P_1 P_2 + (\arcsin r_{112}) / 2\pi = 0,5 \cdot 0,5 + 0,25 = 0,5. \quad (8)$$

Такой же результат дает формула, содержащая условную вероятность:

$$P = P(B_1) P(B_2 | P_1) = 0,5 - 1 = 0,5, \quad (9)$$

где B_1 — случайное событие, заключающееся в том, что i -й элемент работает безотказно; $P(B_2 | P_1)$ — вероятность безотказной работы элемента 2 при условии безотказной работы элемента 1. Здесь $P(B_2 | P_1) = P(B_1 | P_2) = 1$.

Для приближенного расчета системы из последовательных элементов в [13] приводится формула:

$$\frac{1}{P} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{P_i} - (N - 1), \quad (10)$$

которая дает точный результат при $P_i = 0,5$ и $P_i = 1$.

Показано также, что при $r_{112} > 0$ надежность системы выше, чем при независимых элементах, а при $r_{112} < 0$ — ниже. Последний случай возможен в конструкциях, где внешние силы один элемент нагружают, а другой разгружают.

Точный учет зависимостей элементов по нагрузке имеет место для простого случая расчета ВБР цепи из одинаковых элементов, случайно нагруженных и со случайными прочностными свойствами [15]. Однако используемая модель системы из идентичных компонентов не может быть непосредственно использована в расчетах машин и механизмов, которые содержат разные компоненты, имеющие различные режимы нагружения и несущую способность.

Из проведенного анализа следует, что учет зависимого поведения элементов разработан лишь для отдельных специальных случаев, которые не могут быть использованы при расчете надежности машин и других подобных сложных систем с различными нагруженными компонентами.

Цель статьи — представить интегрированную процедуру расчета машины как системы с зависимыми различными нагруженными компонентами и сложной логикой предельных состояний (отказов) деталей, узлов, агрегатов и машины в целом. Статья аккумулирует и развивает положения по расчету надежности машин, приведенные в [5], [16]—[19].

Расчет надежности машины как сложной механической системы с зависимыми элементами. Общие положения

Расчет ресурса машины как сложной механической системы с зависимыми элементами имеет смысл только в вероятностной постановке. Такой расчет носит характер вероятностного прогноза.

Проблемы ресурсного расчета механической системы отражают общие проблемы моделирования поведения сложных систем. Принципиальной особенностью таких систем является *организованное поведение их элементов*. Это положение согласуется с получающей все большее распространение синергетической парадигмой как новым мировоззрением, общенаучной концепцией и методической основой объектных теорий [20]. Для объектных теорий выделяют следующие принципы: нелинейность (несохранение аддитивности); неустойчивость; открытость; подчинение. Последний принцип является ключевым для понимания и описания организованного поведения частей (элементов) системы [21]. На его основе параметры порядка «управляют» поведением отдельных частей. В реальных системах число параметров порядка невелико, что позволяет анализировать поведение системы на основе упорядочивающего действия этих факторов. Кроме того, рассмотренная ситуация приводит к коррелированному поведению частей системы.

Направление, изучающее ресурсные свойства не только элементов (предельных состояний деталей), но и механических систем в целом, названо «ресурсной механикой машин» (РММ) [22], [23]. В основе этого направления — обоснование и реализация принципа ресурсно-зависимого поведения элементов в нагруженной механической системе. Иначе говоря, ресурсы различных деталей по их возможным предельным состояниям зависят из-за общих факторов (внешних и внутренних), которые всегда действуют в машинах и их окружении. Принцип зависимости элементов является фундаментальным и дает основу для объяснения отличий в поведении системы по сравнению с поведением отдельных элементов.

РММ, реализуя этот принцип, направлена на разработку моделей и процедур, учитывающих эффекты зависимого поведения элементов. Выявлены и классифицированы характерные зависимости, связывающие и организующие поведение элементов многоэлементной нагруженной системы [5]. Эти зависимости проявляются на уровне отдельной системы и на уровне группы рассматриваемых систем.

Для уровня *отдельной системы (конкретной машины)* можно выделить следующие типовые случаи проявления эффектов взаимодействия элементов, их согласованного, кооперативного, упорядоченного поведения.

Колебательные процессы механической системы. Поведение механической системы нельзя вывести из поведения отдельных ее частей. В кибернетических моделях передаточная функция системы простыми операциями определяется по передаточным функциям отдельных частей. В механике для получения передаточной функции системы необходима общая модель, в которой все элементы связаны друг с другом. Колебания любой механической системы, даже линейной в математическом смысле, характеризуются эффектами усиления—ослабления, т.е. поведение нелинейное в смысле отклонения от ожидаемого. Типичный пример — резонанс: небольшое возмущение и несоизмеримо большая реакция.

Зависимость начальных параметров несущей способности элементов. Имеет место для конструктивных элементов одной детали и различных деталей, изготовленных в рамках одной партии или по сходной технологии.

Зависимость нагруженности и ресурса элементов от общего уровня нагруженности, обусловленного условиями эксплуатации конкретной механической системы. Является глобальной, присущей всем механическим системам, различается степенью проявления: от сильной (квазидетерминированной) связи до слабой вероятностной.

Связь между нагруженностью (повреждаемостью) и несущей способностью элемента. В отличие от других эта зависимость имеет элементный характер и относится к факторам, обычно рассматриваемым независимо, например, спектру нагрузок и пределу выносливости.

Круговые зависимости состояний конструктивных элементов нагруженного узла. Подобная связь состояний может иметь непосредственный характер, а может реализовываться через параметры рабочих процессов, обычно нагруженности и наработки. Характерными круговыми зависимостями обладают взаимосвязанные процессы износа и усталости рассмотренных трибофатических объектов.

Перечисленные эффекты являются типовыми для механических систем. Они приводят к отклонению поведения механической системы от ожидаемого поведения (реакции), которое прогнозируется на основе характеристик элементов.

На уровне *группы механических систем (парка однотипных машин)* прогнозируется ресурс в форме вероятностного расчета. Основные варьируемые факторы — характеристики несущей способности элементов и общие условия эксплуатации машин.

Каждый элемент из множества однотипных элементов парка машин имеет свою собственную кривую распределения нагрузок. Эта кривая определяет меру повреждения элемента. Распределение меры повреждения сопоставляется с распределением характеристики несущей способности. В обычной расчетной практике полагают, что распределения мер повреждения, относящиеся к элементам различного типа, независимы, также как и распределения их характеристик несущей способности. При этом для каждой пары распределений получается независимое от других распределение ресурса элемента (подшипника, зубчатого колеса по контактной выносливости и т.п.). В действительности меры повреждения как однотипных, так и разнотипных элементов в нагруженной механической системе всегда коррелированы. Глобальным фактором, при-

водящим к корреляции, является уровень нагруженности, который определяется уровнем основных технологических сопротивлений машины и, в конечном счете, условиями ее эксплуатации. Условия эксплуатации, а не уровни нагруженности являются первопричиной, и именно они должны фигурировать в качестве организующего фактора в расчетах.

Особенности учета связей элементов. В общем случае в машине как механической системе можно выделить подсистемы трех типов: 1) с квазидетерминированными (сильными) связями; 2) вероятностными (средними); 3) слабыми [5].

Представителями подсистем первого типа являются редукторы, ведущие мосты, колесные передачи, планетарные ряды коробок передач и т.д., у которых нагрузки зубчатых колес и подшипников обусловлены входными моментами в узел. Меры повреждения (циклонапряженности) элементов таких узлов имеют различные значения, но сильно согласованный характер, поскольку определяются одним и тем же входным моментом и числом оборотов входного вала. Для подобных подсистем возможно построение процедуры расчета ресурса, основанной на воспроизведении квазидетерминированных связей и понятии «эквивалентных пар распределений» мер нагружения и несущей способности [5].

Учет корреляции ресурсов элементов и расчет систем второго типа значительно более сложен методически по сравнению с воспроизведением квазидетерминированных связей. В рамках рассматриваемого подхода коррелированное поведение организуется не за счет статистической информации, которая при проектировании отсутствует, а применением содержательных моделей и процедур, отображающих действия общих факторов.

При этом общим подходом является вероятностная форма расчета и использование при этом имитационных процедур, поскольку они дают возможность в полном объеме воспроизвести все связи элементов. Только при такой форме возможен учет возможных различных отказов элементов. В рамках этой особенности обеспечивается воспроизведение зависимостей элементов моделируемой системы, основанной на переходе к ресурсной форме в моделях повреждения элементов, использовании ресурсно-прочностных кривых и вариации характеристик несущей способности элементов и условий эксплуатации.

Прогнозирование ресурса машины (сборочной единицы) как системы со сложной логикой предельных состояний. В расчетах до первого отказа ресурс системы определяется по минимальному из ресурсов элементов. Понятие ресурса до предельного состояния может основываться на сложных логических схемах, отличных от схемы расчета ресурса до первого отказа. Например, ресурс трактора считается исчерпанным, если потребовалась замена или проведение капитального ремонта не менее двух его основных частей (двигатель, коробка передач, задний мост, передний мост), одна из которых — двигатель, и хотя бы одной из дополнительных частей (полурама, кабина) [26]. Ресурс агрегата определяется достижением предельного состояния нескольких его составных частей (деталей).

Совместное рассмотрение ресурсных и функциональных свойств. На основе вероятностной идеологии РММ проработан подход к описанию ресурсных и функциональных свойств в рамках единой модели, отражающей реальный вероятностный характер поведения множества машин в эксплуатации [27—29].

Расчет надежности механической системы с сильными связями элементами по нагруженности (первый тип связей)

Расчет систем с сильными (квазидетерминированными) связями имеет самостоятельное значение. Он может быть построен без привлечения процедур имитационного моделирования. Предлагаемый подход основан на введении понятия «эквивалентных пар распределений» мер нагружения и несущей способности. Тем самым расширяется подход к расчету систем типа цепи [15], путем распространения его на системы, состоящие из различных (разнотипных) элементов. При этом используется более мягкое условие: согласованности нагрузок, или согласованности их мер повреждения (а не равенства, как для цепи), что позволяет существенно расширить область применения расчета.

Предполагается, что наработка (время) имеет фиксированное значение $L=L_j$, и отказы (предельные состояния) элементов определяются накоплением повреждений. ВБР P_{Lj} каждого элемента определяется по его мере повреждения Q_{Lj} и несущей способности R . Система (узел, механизм) имеет элементы с различными парами распределений Q_{Lj} and R . Если соответствующие меры повреждения различных элементов строго зависимы (согласованы, линейно связаны), то для расчета надежности может быть использован следующий подход.

Для случайных величин вводится понятие «эквивалентных пар распределений». Пара распределений $\{f_{Rj}(R), f_{Qj}(Q)\}$ эквивалентна паре $\{f_{Rij}(R_{ij}), f_{Qij}(Q_{ij})\}$, если распределение $f_{Yj}(Y)$ случайной величины $Y_j=R_j-Q_j$ совпадает с распределением $f_{Yij}(Y)$ случайной величины $Y_{ij}=R_{ij}-Q_{ij}$, т.е. $f_{Yj}(Y)=f_{Yij}(Y)$.

С использованием этого понятия могут быть получены эквивалентные пары распределения $\{f_{Qa}(Q), f_{Raa}(R)\}$, $\{f_{Qa}(Q), f_{Rab}(R)\}$, $\{f_{Qa}(Q), f_{Rac}(R)\}$ и т.д., у которых одно и то же распределение меры повреждения $f_{Qa}(Q)$ для каждого элемента системы ($x=a, b, c, \dots$).

Указанная операция иллюстрируется рисунком 2, где показаны две пары распределений: первая $f_{Qa}(Q), f_{Raa}(R)$ соответствует элементу a , вторая $f_{Qa}(Q), f_{Rab}(R)$ — элементу b . Для элемента b выполнено приведение его меры несущей способности к распределению Q_a элемента $x=a$, и сформировано распределение $f_{Rba}(R)$. В результате для элемента b получена эквивалентная пара распределений $f_{Qa}(Q)$ и $f_{Rba}(R)$. Таким образом, у элементов a и b распределение меры повреждения — одно и то же $f_{Qa}(Q)$ (кривая 1 на рисунке 2), а меры несущей способности — разные (кривые 2 и 5).

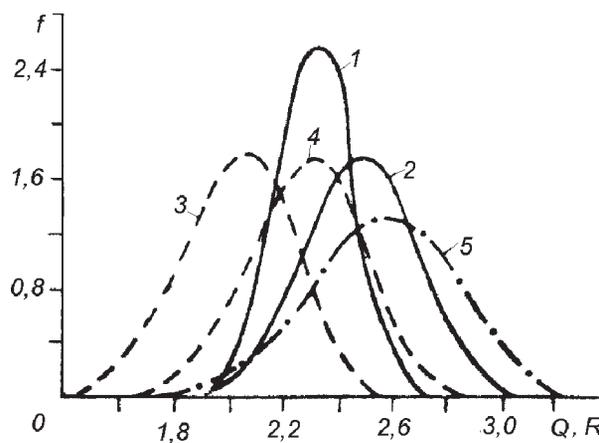


Рисунок 2 — Приведение распределений к одной мере повреждений: 1 — функция $f_{Qa}(Q)$; 2 — $f_{Raa}(R)$; 3 — $f_{Qb}(Q)$; 4 — $f_{Rab}(R)$; 5 — $f_{Rba}(R)$

В случае нормальных распределений получение параметров нормального распределения f_{Rba} основано на соотношениях, в которых использованы параметры рассматриваемых распределений: средние значения \bar{R} и средние квадратические отклонения \bar{S} :

$$\bar{R}_{ba} = \bar{R}_b - \bar{Q}_b + \bar{Q}_a; \quad (11)$$

$$S_{ba}^2 = S_{Rb}^2 - S_{Qb}^2 + S_{Qa}^2. \quad (12)$$

Аналогичные операции могут быть выполнены для других элементов системы.

На последующем этапе расчета ищется функция распределения несущей способности системы $F_E(R)$ как функция минимальных значений для эквивалентных распределений $F_{Rxa}(R)$:

$$F_E(R) = 1 - \Pi(1 - F_{Rxa}(R)), \quad x = a, b, \dots, N. \quad (13)$$

В результате рассматриваемая система сводится (в смысле надежности) к одному эквивалентному элементу с известными распределениями несущей способности $F_E(R)$ и меры повреждения $F_{Qa}(Q)$. Затем известными методами определяется ВБР $P(L)$.

Повторением описанной процедуры для других значений наработки L строится функция надежности (вероятности безотказной работы) системы $P(L)$.

В качестве примера представлены планетарный редуктор (рисунок 3 сверху) и результаты его расчета (см. рисунок 3 снизу). Построение исходных распределений мер несущей способности и мер повреждения редуктора выполнено методами, описанными в [5], [24], [25].

Кривая 1 представляет собой интегральную функцию $P(L)$, а кривая 2 — плотность вероятности наработки $f(L)$. Плотности вероятности распределений наработки представлены также для лимитирующих надежность элементов редуктора: подшипника сателлита по контактной усталости (*a*); зубьев солнечной шестерни по контактной усталости (*b*); зубьев сателлита: по контактной усталости (*c*) и по усталости при изгибе (*d*).

Расчет надежности механической системы (общий случай)

Подходы к расчету надежности машины машин можно классифицировать по степени отображения в них рабочих процессов машины, ее агрегатов и систем. Полное отображение в моделях рабочих процессов может быть обеспечено за счет имитационного моделирования всего парка рассматриваемых машин за весь их срок службы. Однако такая задача нереальна, и для практического использования в рамках РММ разработана процедура, сочетающая имитационные фрагменты и использование обобщенных параметров и переменных для отдельных фрагментов моделирования.

Общий подход к расчету машины воспроизводит отмеченную выше вероятностную природу свойств компонентов и эффекты зависимого поведения их в системе. Для этого используется многоуровневое представление машины (рисунок 4) и моделирование по методу Монте-Карло.

Низшие физические уровни (5, 6 и в ряде случаев 7) содержат описание несущей способности элементов и их ресурсно-прочностных кривых, что позволяет реализовывать в расчетах зависимость по общим условиям эксплуатации и другие зависимости элементов.

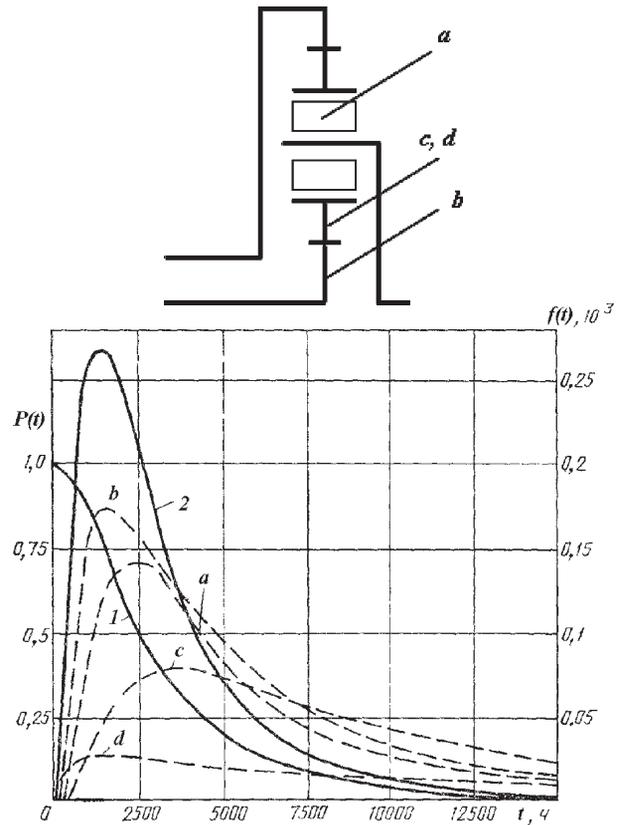


Рисунок 3 — Планетарный редуктор и результаты расчета его надежности

Предварительными процедурами являются: получение спектра относительной продолжительности условий эксплуатации для вероятностной модели; построение ресурсно-прочностных кривых; выбор распределений характеристик несущей способности компонентов (если их поведение воспроизводится с нижних, механических уровней) либо характеристик отказов элементов (при воспроизведении поведения отдельных компонентов со структурных уровней).

Вероятностная модель условий эксплуатации. Условия эксплуатации описываются вероятностным способом (рисунок 5) в форме вариации (распределений относительных продолжительностей) типовых условий, кото-

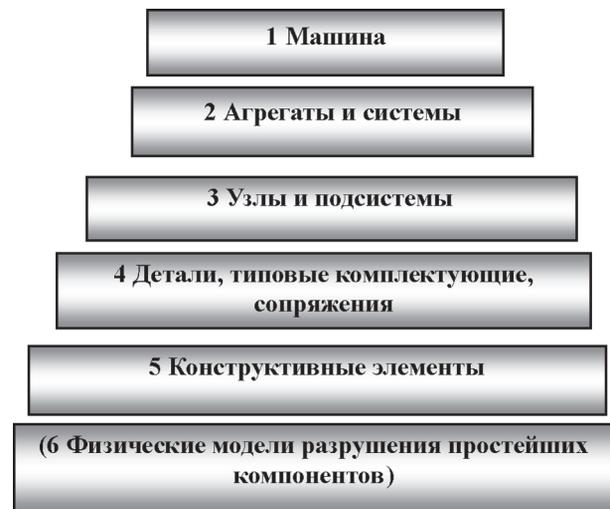


Рисунок 4 — Уровни представления машины как иерархической системы компонентов (Levels for presentation of machine as hierarchical system of components)

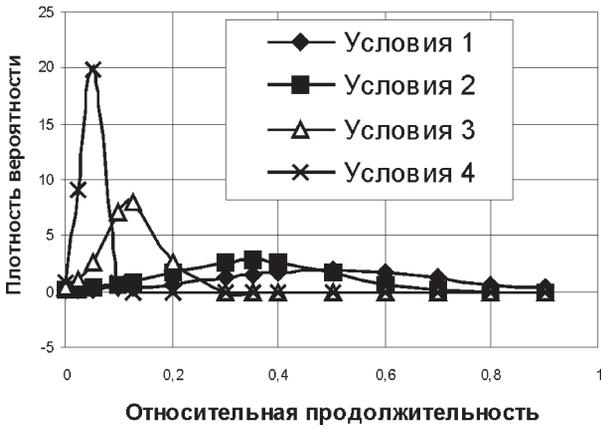


Рисунок 5 — Представление условий эксплуатации: вероятностный спектр относительных продолжительностей (Representation of operation condition: probabilistic spectrum of relative durations)

рые принимаются как характерные для рассматриваемого типа машин (например, движение в городе, на автострате, на шоссе в холмистой местности и т.д.).

Каждая машина имеет специфический набор относительных продолжительностей α_k , но их общая сумма равна единице. Когда выполняется статистическое моделирование, вероятностные характеристики случайных величин, начальные и скорректированные по общей сумме, отличаются. Следовательно, обязателен предварительный выбор параметров для исходных распределений.

Чтобы обеспечить условие $\sum \alpha_k = 1$ в каждом цикле имитационного моделирования, который соответствует воспроизведению спектра условий эксплуатации отдельной машины, необходима специальная корректировка. Близость параметров распределений α_k к заданным значениям обеспечивается посредством многошаговой оптимизационной процедурой [30]. Результат показан в таблице 3.

Полученные параметры исходных случайных величин используются в главной процедуре моделирования.

Ресурсно-прочностные кривые (зависимости). Ресурсно-прочностные кривые (РПК) представляют собой набор (по числу условий эксплуатации) зависимостей ресурсов компонента от параметра его несущей способности в определенных условиях эксплуатации.

Таблица 3 — Поиск исходных параметров относительной продолжительности условий эксплуатации (УЭ): OC = operation conditions; Aver = average (среднее); ASD = average square deviation (среднее квадратическое отклонение); RV's = random values (случайные величины, СВ)

УЭ (OC)	Заданные параметры (Given parameters)		Полученные в результате поиска параметры исходных СВ (Obtained parameters of the initial RV's)		Полученные параметры согласованных СВ, у которых сумма в каждом испытании равна единице (Obtained parameters of the related RV's)	
	Aver	ASD	Aver	ASD	Aver	ASD
1	0,50	0,037	0,500	0,075	0,513	0,036
2	0,35	0,026	0,350	0,008	0,341	0,026
3	0,12	0,009	0,120	0,003	0,121	0,009
4	0,02	0,002	0,025	0,000	0,024	0,002

Эти зависимости могут быть графическими или аналитическими. Например, для распространенных случаев усталостных отказов элементов трансмиссии в качестве характеристик несущей способности используются пределы выносливости по изгибу и контакту зубьев зубчатых колес (графические зависимости) и динамическая грузоподъемность подшипников качения (аналитическая зависимость). Такие кривые (рисунок 6) получают детерминированным расчетом методами механики.

РПК выполняют две функции. Первая состоит в том, что определение ресурса в главной процедуре происходит путем обращения к РПК без проведения подробного расчета ресурса компонента. При этом могут быть получены ресурсы для любых промежуточных значений параметра несущей способности. Вторая функция состоит в том, что РПК обеспечивают согласованное определение ресурсов для всех условий эксплуатации в зависимости от выбранного в процессе моделирования случайного значения параметра несущей способности. Тем самым обеспечивается глобальная зависимость ресурсов компонентов по нагруженности, и, в конечном счете, от условий эксплуатации.

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

Далее по ресурсно-прочностным кривым находят ресурсы компонентов, а затем с учетом относительных продолжительностей условий — ресурс системы в целом. Таким образом, ресурсы компонентов и системы формируются параллельно, в рамках одной вычислительной процедуры. Тем самым воспроизводятся реальные (согласованные) отказы компонентов отдельно взятой машины, а не отказы, выбранные из общей совокупности отказов компонентов по парку машин, что характерно для подходов, используемых в расчетах традиционной теории надежности.

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

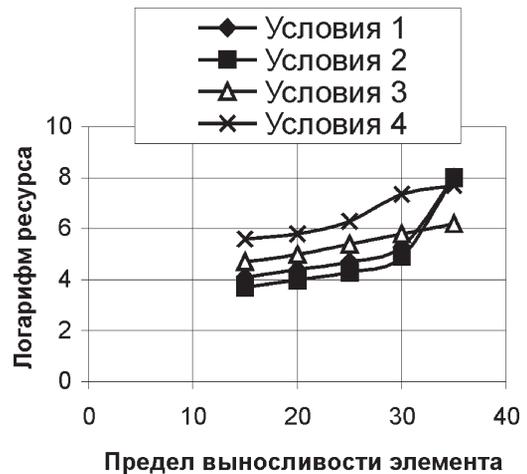


Рисунок 6 — Набор ресурсно-прочностных кривых для различных условий эксплуатации (Set of lifetime-strength curves for different operation conditions)

Расширенная основная процедура моделирования, включающая сложную логику предельных состояний для составных частей и машины в целом. Ресурс машины как сложного объекта со многими предельными состояниями определяется на основе сложной логики. Для описания таких ситуаций в традиционной теории надежности используются блок-схемы расчета надежности (RBD) и метод анализа дерева отказов (FTA). Однако силу громоздкости и трудоемкости построения, они имеют ограниченные возможности при расчете сложных объектов. Кроме того, для их применения требуются данные по надежности компонентов системы как исходной информации. Поэтому для эффективного расчета машин и других сложных объектов, формального описания их предельных состояний как многоуровневых систем в РММ вводится *схема предельных состояний* (СПС) [19, 29, 31].

СПС состоит из иерархической структурной схемы, объектами которой являются компоненты машины, и записей предельных состояний для объектов всех уровней кроме низшего. Все объекты, кроме высшего (машины), наделяются типом. При этом объекты, отказы которых имеют одинаковую значимость для объекта более высокого уровня, относят к одному типу. Запись (X1, X2, X3 и т.д.) означает, что предельное состояние данного объекта имеет место, если предельных состояний достигли его X1 составных части первого типа (X1 — число, стоящее в первой позиции), X2 составных части второго типа (X2 — число, стоящее во второй позиции) и т.д. Машина (сборочная единица) может иметь несколько СПС.

Так, согласно [26] для механической коробки передач трактора предельным состоянием считается замена (или сложный ремонт) корпуса, или предельное состояние более двух шестерен постоянного зацепления, или одного из валов, или шестерни и подшипников вторичного вала.

С позиций предлагаемого подхода такая механическая коробка передач имеет схему предельных состояний, показанную на рисунке 7, и три схемные записи: (1,0,0,0) (0,3,0,0) (0,0,1,2) для описания ее ПС. При этом корпус и вал отнесены к элементам первого типа, поскольку их предельные состояния имеют одинаковую значимость для ПС коробки передач в целом. По каждой схемной записи определяется ресурс, и в качестве расчетного ресурса принимается наименьшее значение.

Расчет ресурса по схеме предельных состояний является завершающей операцией в каждом цикле расчета ресурса машины.

Простейший пример двухуровневой СПС для машины (трактора) показан на рисунке 8. Согласно [26] 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 (полурама, при ее наличии, и кабина).

В соответствии с описанием предельного состояния трактор можно представить как машину, состоящую из составных частей трех типов. А схема предельных состояний будет иметь вид (1,1,1). Запись (1,1,1) означает, что предельное состояние машины наступает, если предельные состояния имеют место у двигателя (тип 1), одного из основных агрегатов (тип 2) и одного из дополнительных агрегатов (тип 3).

Исходные данные и результаты расчета машины по описанной схеме ПС представлены в таблице 4.

Результат расчета «до первого отказа» приведен для сравнения. При этом воспроизведен худший случай, когда отказы агрегатов приняты независимыми. В действительности ресурсы до первого отказа будут несколько выше из-за корреляции предельных состояний агрегатов. Видно, что ресурс с учетом логики ПС существенно отличается от результата расчета по последовательной схеме до первого отказа.

Заключение

Зависимое поведение элементов — основная проблема в расчетах машин и других сложных систем. Разработанные подходы и основанные на них методы ресурсной механики позволяют воспроизводить действительные связи между компонентами и, тем самым, методически корректно рассчитывать реальную надежность машины как многокомпонентной системы.

Следующий принципиальный аспект в расчете надежности машины и ее компонентов — это описание и учет сложной логики их предельных состояний/отказов. Многоуровневое представление машины и интеграция механической и структурной надежности, во многом способствуют решению этой проблемы.

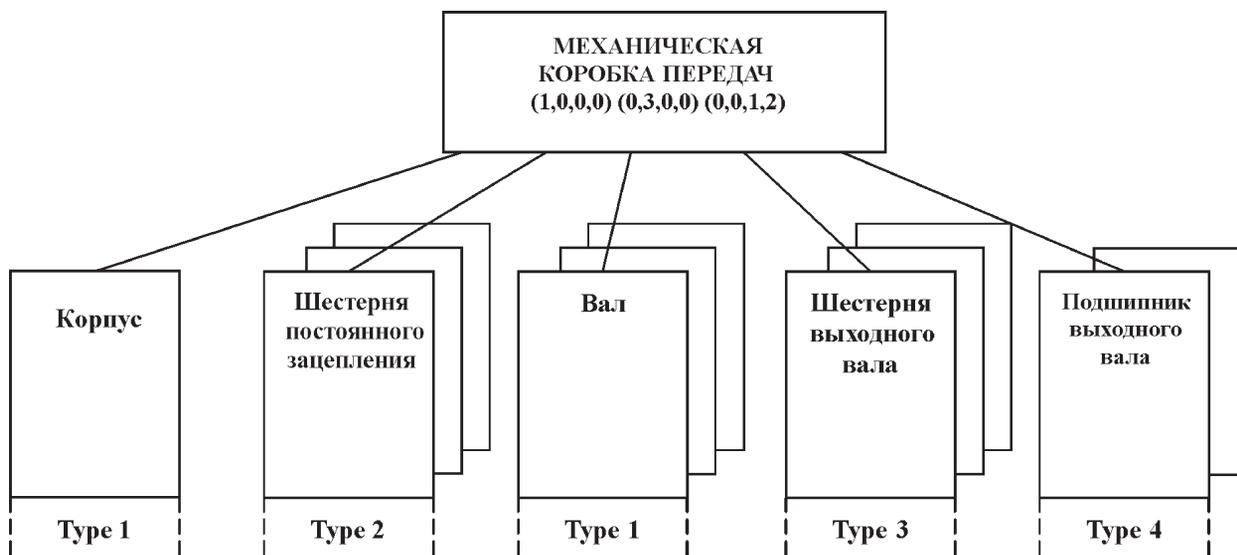


Рисунок 7 — Схема предельных состояний механической коробки передач (Scheme of limiting states for a mechanical gearbox)

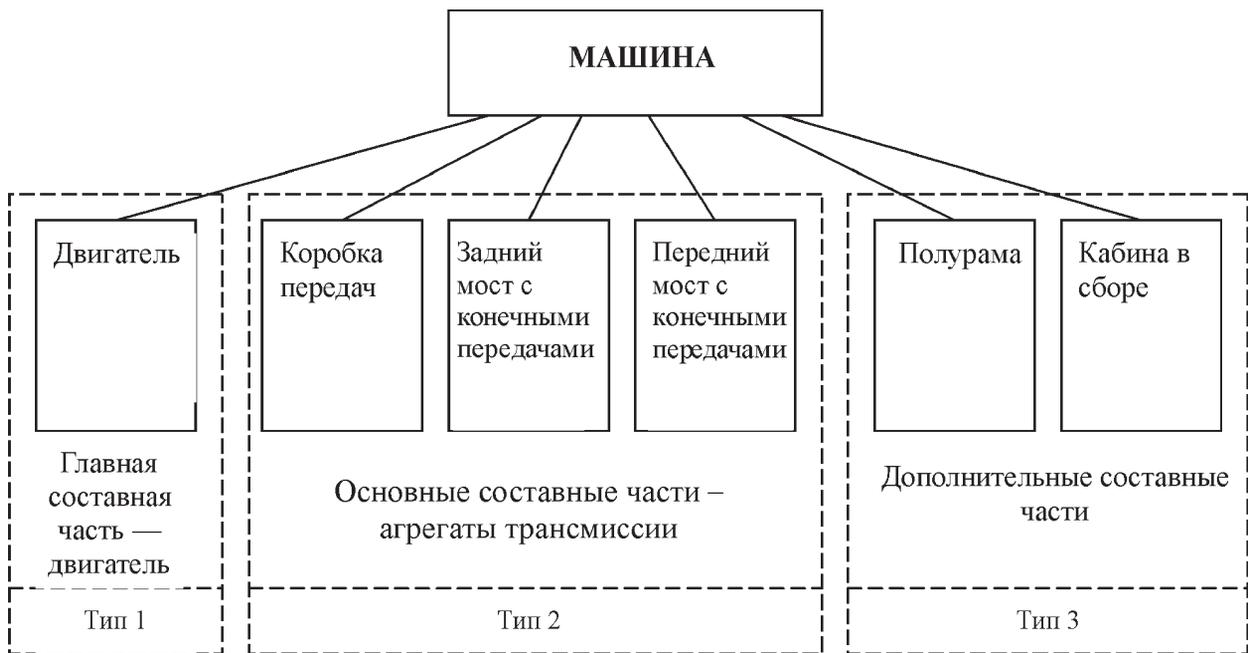


Рисунок 8 — Схема предельных состояний машины с тремя типами составных частей (Scheme of limiting state for a machine with parts of three types)

Таблица 4 — Расчет ресурса машины (Machine lifetime calculation)

Объект	Закон распределения ресурса	Коэффициент вариации ресурса	Ресурс, ч	
			средний	80 %-й
Исходные данные (Initial data)				
Двигатель (тип 1)	Логарифмически нормальный	0,45	15700	10000
Коробка передач (тип 2)		0,55	17300	
Передний ведущий мост (тип 2)		0,45	15500	
Задний ведущий мост (тип 2)		0,45	15800	
Кабина (тип 3)		0,50	17000	
Результаты расчета ресурса машины (Results of machine lifetime calculation)				
Машина в целом (до первого отказа)	По виду близок к логарифмически нормальному, но в точности ему не соответствует	0,29	9100	6870
Машина в целом (с учетом логики предельных состояний)		0,38	20700	14230

В рамках представленных подходов введены новые расчетные инструменты: концепция «эквивалентных пар распределений» для случайных величин, ресурсно-прочностные кривые для компонентов, схемы предельных состояний для реализации сложной логики предельных состояний машины и ее компонентов. Использование упомянутых инструментов позволяет рассчитывать реальную надежность машины как системы с зависимыми компонентами и сложной логикой предельных состояний.

Для реализации общего подхода, его имитационных составляющих, необходима разработка соответствующего программного обеспечения, что является предметом специального рассмотрения в дальнейшем.

Список литературы

- Хазов, Б.Ф. Справочник по расчету надежности на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. — М.: Машиностроение, 1986.
- Inacio, C. Mechanical reliability / C. Inacio // Carnegie Mellon Univ. [Electronic resource]. — 1998. — Mode of access: http://www.ece.cmu.edu/~koopman/des_s99/mechanical/index.html.
- Bertsche, B. Reliability in automotive and mechanical engineering / B. Bertsche. — Springer, 2008.
- Vintr, M. Reliability assessment for components of complex mechanisms and machines / M. Vintr // In 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18–21, 2007. — 4 p.
- Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин. — Минск: Наука і тэхніка, 1995. — 256 с.
- Pozsgai, P. Models to consider dependence in reliability calculation for systems consisting of mechanical components / P. Pozsgai, W. Neher, B. Bertsche // [Electronic resource]. — 2002. — Mode of access: <http://www.math.ntnu>.
- Fiondella, L. Estimating system reliability with correlated component failures / L. Fiondella, S.S. Gokhale // Int. Journal of Reliability and Safety. — 2010. — Vol. 4, № 2/3. — pp. 188–205.
- Machines and mechanisms design for reliability / A. Hahnel [et al.] // In 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18–21, 2007. — 7 p.

9. Bertshe, V. Verbesserte Berechnung der Systemlebens-Sdauer von Produkten des Maschinenbaus / V. Bertshe, G. Lechner // *Ronstrukturm.* — 1986. — Vol. 38, № 8. — pp. 315—301.
10. Вопросы математической теории надежности / под ред. В.А. Гнеденко. — М.: Радио и связь, 1983.
11. Снесарев, Г.А. Расчет редукторов на надежность / Г.А. Снесарев // *Вестн. машиностроения.* — 1988. — № 8. — С. 45—47.
12. Прогнозирование надежности тракторов / под общ. ред. В.А. Аниловича. — М.: Машиностроение, 1986.
13. Кузнецов, А.А. Надежность конструкции баллистических ракет / А.А. Кузнецов. — М.: Машиностроение, 1986.
14. Баллистическая ракета на твердом топливе / А.М. Синюков [и др.]. — М.: Воениздат, 1972.
15. Капур, К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон; пер. с англ. — М.: Мир, 1980.
16. Algin, V.B. Calculation of lifetime of a mechanical system containing tribo-fatigue elements / V.B. Algin // *In III International Symposium on Tribo-Fatigue, Beijing, China, 2000.* — pp. 196—199
17. Альгин, В.Б. Ресурсная механика как основа прогнозирования и обеспечения износо-усталостной надежности машин / В.Б. Альгин // *Трибофатика: тр. IV Междунар. симпоз. по трибофатике (ISTF 4), 23—27 сент. 2002 г. Тернополь, Украина / отв. ред. В.Т.Трошенко.* — Тернополь: Тернопольский гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя, 2002. — Т. 1. — С. 55—60.
18. Альгин, В.Б. Ресурсная механика и трибофатика / В.Б. Альгин // *Трибофатика: труды V Междунар. симпоз. по трибофатике, 3—7 окт. 2005, Иркутск, Россия.* — Иркутск: ИргУПС, 2005. — Т. 1. — С. 66—73.
19. Algin, V.B. Reliability and Lifetime of Mechanical Units in Operation and Test / V.B. Algin, H.-E. Kim // *Key Engineering Materials.* — Switzerland: Trans Tech Publications, 2006. — Vol. 326—328. — pp. 549—552 // [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.scientific.net/0-87849-415-4/13.html>. — 549 p.
20. Аршинов, В.И. Синергетическое знание: между сетью и принципами / В.И. Аршинов, В.Э. Войцехович. // *Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов.* — М.: Прогресс-традиция, 2000. — С. 107—120.
21. Хакен, Г. Основные понятия синергетики / Г. Хакен // *Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов.* — М.: Прогресс-традиция, 2000. — С. 28—55.
22. Альгин, В.Б. Необходимый этап перехода. От расчетов деталей — к ресурсной механике машин / В.Б. Альгин // *Инженер-механик.* — 2000. — № 3. — С. 21—23.
23. Альгин, В.Б. Ресурсная механика машин: становление и перспективы / В.Б. Альгин // *Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр. — Вып. 1: в 3-х т. / под общ. ред. П.А. Витязя.* — Минск: Технопринт, 2002. — Т. 2. — С. 321—325.
24. РД 50-639-87. Методические указания. Надежность в технике. Расчет показателей надежности. Общие положения. — М.: Госстандарт, 1987.
25. Цитович, И.С. Анализ и синтез планетарных коробок передач автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, В.Б. Альгин, В.В. Грицкевич. — Минск: Наука и техника, 1987.
26. РТМ 70.0001.246-84. Критерии предельного состояния тракторов и их составных частей. — М., 1985.
27. Альгин, В.Б. Согласованный прогноз ресурсных и функциональных свойств мобильной техники / В.Б. Альгин // *Вестн. Могилевского гос. техн. ун-та.* — 2001. — № 1. — С. 6—13.
28. Algin, V.B. Lifetime-and-Operation Mechanics as a Basis for Design, Prediction and Estimation of Machine Properties / V.B. Algin // *Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механике.* — Минск: Технопринт, 2001. — С. 18—22.
29. Альгин, В.Б. Методология ресурсно-функционального вероятностного расчета, проектирования и оценки мобильной техники / В.Б. Альгин // *Механика машин на пороге III тысячелетия: материалы междунар. науч. конф., Минск, 23-24 нояб. 2000 г.* — Минск: Белавтотракторостроение, 2001. — С. 292—306.
30. Альгин, В.Б. Вероятностная модель спектра условий эксплуатации мобильной техники / В.Б. Альгин, И.Г. Богдановский // *Вестн. Могилевского гос. техн. ун-та.* — 2001. — № 1. — С. 14—17.
31. Альгин, В.Б. Схемы предельных состояний и расчет ресурса машин / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий, А.И. Суровцев // *Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр. — Вып. 1: в 3-х т. / под общ. ред. П.А. Витязя.* — Минск: Технопринт, 2002. — Т. 2. — С. 344 — 348.

Algin V.B.

Calculation of real reliability for machine. Approaches of Lifetime mechanics

The traditional reliability theory deals with systems consisting of the physically depersonalized components which are described by the set of reliability indexes. Mechanical engineering operates with stresses of machine parts, and sometimes with their lifetimes. Dependences of components which take place at mechanical level are not reproduced in the traditional theory of reliability that leads to erroneous results in evaluating machine reliability. The paper presents novel approaches and techniques for calculation of machine reliability, since mechanical models and finishing by structural ones, with consideration of complicated logic of limiting states for machine components (parts, units, assemblies, and so on) and the machine as a whole. Factors, which determine typical dependences of machine components, are presented. Two approaches are offered: 1) the special approach for calculation of strongly connected components; 2) the general approach based on statistical modeling a spectrum of machine operation conditions, loading modes, damages and failures (limiting states) of components and machine as a whole. Such approaches allow considering real behavior of components in the machine and thus to compute correctly the machine reliability.

Поступила в редакцию 13.12.2010