

$$N_r(\sigma) = N_G \left( \frac{\tau_f \varphi_r(\sigma)}{\tau_W} \right)^{m_r \varphi_m(\sigma)} \quad (15)$$

где функции

$$\varphi_m(\sigma) = \frac{\lg(\tau_f / \tau_L)}{\lg(\tau_f \varphi_r(\sigma) / \tau_L)}, \quad \varphi_r(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{R_{\tau/\sigma}} - \frac{\sigma^2}{\sigma_R^2}} \quad (16)$$

Важное достоинство формул (13) и (15) состоит в том, что ресурс силовых систем и при прямом, и при обратном эффектах вычисляется с использованием только обычных параметров кривых механической ( $\sigma_R, m_\sigma, N_G$ ) и фрикционной ( $\tau_f, m_\tau, N_G$ ) усталости, как это следует из формул (14) и (16).

*Заключение.* Формулы (2), (6), (13), (15) либо формулы (3), (7), (10), с учетом (11) и (12) могут, по-видимому, служить основой ресурсного проектирования элементов конструкций (по критерию объемного усталостного разрушения), пар трения (по критериям поверхностного износостойкого повреждения) и силовых систем (по комплексному критерию износоустойчивости повреждения и разрушения) на базе того или иного, но единого для всех объектов методологического подхода.

*Литература.* 1. Трибофатика. Термины и определения. (Межгосударственный стандарт ГОСТ 30638-99). – М.: 24 с. 2. Сосновский Л.А., Трощенко В.Т., Махутов Н.А. и др. Износоустойчивые повреждения и их прогнозирование (трибофатика). – Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. – 170 с. 3. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. О полной кривой усталости // Заводская лаборатория, 1995, №5. – С. 33 – 34. 4. Иванова В.С., Теретьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с. 5. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник в 2-х т.т. – Киев, Наукова думка. – 1330 с. 6. Сосновский Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения. – Минск, 1987. – 288 с. 7. Бабли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с. 8. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

УДК 621.585 – 192

Альгин В.Б.

## РЕСУРСНАЯ МЕХАНИКА МАШИН: СТАНОВЛЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Научный центр проблем механики машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

Ресурсные свойства относятся к фундаментальным, они присущи всем материальным объектам. Однако вопросы ресурса механических систем получили развитие и научное оформление сравнительно недавно. Особенностью ресурсной механики машин (РММ) является изучение ресурсных свойств не отдельных деталей, а механических систем в целом. Одним из основных источников ресурсной механики являются вероятностные методы расчета деталей машин, разработанные членом-корреспондентом АН БССР И.С.Цитовичем и его научной школой.

Становление ресурсной механики как научного направления связано со следующими тремя этапами.

Первый этап относится к концу 1970-х – середине 1980-х гг., когда был выделен и исследован класс объектов “мобильные машины”, обладающий двумя следующими характерными признаками [1, 2]:

- существенная вариация условий эксплуатации;
- наличие оператора (водителя), действия которого также вариативны, во многом определяют динамическую нагруженность и вносят существенный вклад в повреждаемость машины.

Указанные признаки присущи всем машинам, но особенно отчетливо они проявляются у мобильных. Разработанные для них методические положения в дальнейшем применяются и к другим типам машин.

Второй этап (конец 1980-х – середина 1990-х гг.) отмечен тем, что выделен круг вопросов ресурсного проектирования и сформулирована основная задача: выбор размеров конструктивных элементов, удовлетворяющих требованиям компоновки и ресурса сборочной единицы в целом [3 - 7]. Эта задача включает в себя как составную часть прогноз ресурса сборочной единицы.

Задача имеет многовариантный и итеративный характер, решается последовательным приближением. В каждом итеративном цикле выполняется прогнозирующий ресурсный расчет. Выделены так называемые динамически зависимые элементы, выбор размеров которых невозможен без проведения динамического расчета. Показано, что необходима интеграция динамического расчета в процедуру ресурсного проектирования.

Третий этап (с середины 1990-х гг.) соответствует оформлению РММ как научного направления, предмет которого – ресурсные свойства машиностроительных систем [8]. Базовым при этом является принцип ресурсно-зависимого поведения элементов в нагруженной механической системе. С использованием машиностроительной терминологии – это принцип ресурсно-зависимого поведения элементов, организованных в конкретный машиностроительный объект. Иначе говоря, ресурсы различных деталей по их возможным предельным состояниям связаны из-за общих внешних и внутренних факторов, которые действуют в машинах. К главной проблематике РММ относится создание развитой ресурсной теории нагруженной сборочной единицы.

Сравнение традиционного (инженерного, в духе курса “Детали машин”) подхода и РММ к расчету и проектированию машин представлено в таблице 1. Пояснения к сопоставляемым аспектам в более полном виде даны в [8].

В общенаучном, междисциплинарном отношении наибольшее значение имеет расчет ресурса системы. С возникновением теории надежности этот вопрос стал формулироваться в явном виде. Однако чисто математические подходы, основанные на перемножении вероятностей безотказной работы отдельных элементов в предположении об их независимости, оказались непригодными.

Проблемы построения расчета системы, исходя из данных об отказах элементах, проанализированы в [9]. В качестве наиболее эффективного средства расчета систем при неполной информации, к которой в математической теории надежности относится информация о зависимостях элементов, предлагается интервальный подход, позволяющий оценить интервал возможных значений показателей надежности.

Промежуточное положение между математической теорией надежности и инженерными подходами занимает направление в теории надежности, которое можно назвать механическим [10].

Сравнение подходов механической теории надежности и ресурсной механики приведено в таблице 2.

В механической теории надежности рассматривается подход “нагрузка – ресурс конструкции” с учетом возможных вариаций нагрузок и свойств материалов. Такая схема в наибольшей степени применима к строительным конструкциям, сооружениям.

Таблица 1

Сравнение подходов к расчету и проектированию машин

Традиционный подход	Ресурсная механика машин
Выбор размеров конструктивных элементов (типоразмеров комплектующих) при проектировании	
Проектный расчет размеров конструктивного элемента на основе приближенных, эмпирических зависимостей	Последовательное приближение – многошаговая процедура, включающая прогноз ресурса механической системы в целом
Расчет элементов	
Расчет напряженного состояния элемента (расчетные напряжения, нагрузки)	Расчет ресурса с использованием ресурсной формы моделей предельных состояний элементов
Оценка работоспособности на основе коэффициенты запаса по долговечности, прочности	Вероятностный расчет ресурса на основе моделей постепенных и внезапных отказов
Расчет по схеме: нагрузка – прочность	Расчет по схеме: условия эксплуатации – ресурс; получение данных для ресурсно-прочностных зависимостей
Описание условий эксплуатации (отчетливое представление об условиях эксплуатации парка машин – основа проектирования)	
Характерные нагрузки, кривые распределения нагрузок в стабилизированных условиях эксплуатации, обобщенные нагрузочные режимы	Вариация общих условий эксплуатации (имитационная модель продолжительности работы машин в отдельных регламентированных условиях эксплуатации)
Учет действий оператора	
Косвенный учет действий оператора в общем уровне коэффициента внешних динамических нагрузок	Комплекс параметров, описывающих действия оператора по выбору режима работы машины и условий смены режимов (реализационное рассеяние условий эксплуатации) Решение динамических задач
Расчет ресурса системы (фундаментальность проблемы – учет зависимого поведения элементов в системе)	
Формула структурной теории надежности: $P = \prod P_i$ и другие типа $P = (1 - a_s) \prod P_i + a_s$ , основанные на информации о вероятности безотказной работы $P_i$ отдельно рассматриваемых элементов	Многоуровневая схема, воспроизводящая процессы, обуславливающие поведение элементов, начиная с уровня общих условий эксплуатации машин Методики расчета, учитывающие организованное поведение элементов в системе

Таблица 2 Сравнение механического направления теории надежности (ТН) и ресурсной механики машин

<p>Механическое направление ТН</p> <p>Подход к задаче проектирования</p> <p>В явном виде не рассматривается</p>	<p>Ресурсная механика машин</p> <p>Выбор размеров конструктивных элементов исходя из ресурсных требований к системе в целом</p>
<p>Подход к задаче прогнозирования ресурса</p>	
<p>Прогнозирование ресурса по схеме "пространство воздействий (нагрузок) – пространство качества объекта", где пространство качества объекта – конечное число параметров, характеризующих степень повреждения его основных узлов и деталей [10]</p>	<p>Принцип ресурсно-зависимого поведения элементов в механической системе. Изучение и классификация основных ресурсных зависимостей. Разработка структурированных схем прогноза ресурса, направленных на воспроизведение основных зависимостей элементов [11]</p>
<p>Основные методы прогнозирования ресурса</p>	
<p>Метод условных функций надежности, фактически сводящийся к численным или имитационным процедурам</p>	<p>Система методов, используемых в зависимости от реализуемой схемы прогноза ресурса</p>
<p>Область разработки и основного применения методов</p>	
<p>Строительная механика</p>	<p>Мобильные машины</p>
<p>Сквозные примеры, иллюстрирующие методологию и методы</p>	
<p>Не приводятся</p>	<p>Прогноз ресурса трансмиссии с использованием ресурсно-прочностных зависимостей и другие [3–8, 11]</p>

Модели, используемые в РММ, имеют более широкий характер, чем схема "нагрузка-прочность" или "нагрузка-ресурс". Они охватывают описание условий эксплуатации, рабочие процессы машин и агрегатов, процессы повреждения, предельные состояния деталей, логику отказов деталей, агрегатов, машины в целом. Их можно характеризовать как механико-логические. Логическая часть описывает наступление предельных состояний машины в зависимости от предельных состояний агрегатов, агрегатов – в зависимости от деталей, деталей – в зависимости от предельных состояний их конструктивных элементов.

Структура моделей в РММ формируется таким образом, чтобы обеспечить согласование процессов и параметров, определяющих ресурс системы в целом, т.е. она направлена на реализацию зависимостей элементов ресурсной системы. Классификация и математическое описание характерных зависимостей элементов механических систем приведены в [11].

К методам РММ относится имитационное моделирование, поскольку учет ряда зависимостей элементов без имитации их поведения невозможен. Однако, чисто имитационным (микро) уровнем обойтись нереально из-за большой размерности систем (в этом одно из методологических отличий РММ от подхода механической ТН). Обязательно присутствуют макроуровневые подходы, основанные на численных методах и аналитических зависимостях. Выбор модели и метода определяется особенностями объекта и теми связями элементов, которые необходимо учесть.

Вероятностный подход и учет зависимостей элементов – эти особенности определяют задачи, присущие РММ, как задачи "неорганизованной сложности". Методология этих задач, занимающих промежуточное положение между чисто детерминированными задачами и чисто стохастическими, в науке наименее разработана. Поэтому любые содержательные наработки РММ обогащают и развивают общесистемные исследо-

вания. В частности, вопросы создания развернутой классификации зависимостей элементов, их формализованное описание и использование в моделях расчета ресурса технических объектов является первоочередным направлением развития РММ.

Второе направление – перенос идей расчета сложных систем из ресурсной области в область функциональных расчетов машин.

Для мобильной техники оценка функциональных свойств основывается на средней скорости и расходе топлива. Общий показатель ресурсных и функциональных свойств можно представить в виде вероятности того, что средняя скорость машины окажется выше некоторой базовой, а расход топлива ниже уровня, принятого за базовый, и при этом ресурс превысит нормативный

$$P(v > v_0, Q < Q_0, L > L_0), \quad (1)$$

где  $v$ ,  $Q$ ,  $L$  – случайные величины;  $v$  – средняя скорость машины на наработке  $L_x$ ;  $Q$  – расход топлива на наработке  $L_x$ ;  $L$  – наработка (ресурс);  $L_0$  – нормативная наработка;  $v_0$ ,  $Q_0$  – значения средней скорости и расхода топлива, принятые в качестве базовых.

Основные варьируемые факторы – это общие условия эксплуатации машин, квалификация водителей, загрузка машин, их техническое состояние, несущая способность конструктивных элементов. В простейшем варианте, а также для сравнительных оценок можно использовать первый и последний из приведенных факторов.

Реализация данного направления позволит отказаться множества противоречивых критериев, используемых при оценке функциональных свойств машин, даст возможность оценивать комплекс ресурсно-функциональных свойств техники. Указанное направление можно охарактеризовать как “Ресурсно-функциональная механика машин”.

**Литература.** 1. Алыгин В.Б. Динамика и надежность трансмиссий мобильных машин. Автореф. дис...канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1979. – 23с. 2. Алыгин В.Б. Проблемы оценки надежности механических систем мобильных машин. – Минск: БПИ, 1980. – 7с. Деп. в БелНИНТИ 20.05.80. № 164. 3. Алыгин В.Б. О расчете надежности механических систем с учетом связей нагрузочных режимов элементов // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1985. № 1. С. 117. (Деп. в ВИНТИ 05.04.84. рег. № 1951-84 Деп. – 15с.) 4. Цитович И.С., Алыгин В.В., Грицкевич В.В. Анализ и синтез планетарных коробок передач автомобилей и тракторов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 224с. 5. Алыгин В.Б. Методика прогнозирования надежности и функциональных размеров сборочных единиц машин при проектировании. Ч.1. Общая схема прогноза надежности механических элементов и систем. – Минск: НИДМАШ АН БССР, 1988. – 40с. 6. Алыгин В.Б. Прогноз надежности сборочных единиц на основе многоуровневой модели рабочего процесса машины // Надежность и контроль качества. – 1988. № 10. – С. 13–18. 7. Алыгин В. Б. Научные основы ресурсного проектирования трансмиссий. Автореф. дис...д-ра техн. наук. – Минск: ИНДМАШ АН Беларуси, 1995. – 35с. 8. Алыгин В. Необходимый этап перехода. От расчетов деталей – к ресурсной механике машин // Инженер-механик. – 2000. № 3. – С. 21–23. 9. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. – СПб: Любавич, 1999. – 160с. 10. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448с. 11. Алыгин В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 256с.