

В. А. ЗОРИН

# ОСНОВЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УЧЕБНИК

*Допущено  
Учебно-методическим объединением  
по образованию в области транспортных машин  
и транспортно-технологических комплексов  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Сервис транспортных  
и технологических машин и оборудования (по отраслям)»  
направления подготовки «Эксплуатация наземного транспорта  
и транспортного оборудования»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2009

УДК 656(075.8)  
ББК 39я73  
3-862

Рецензенты:

зав. кафедрой «Технология металлов» Московского государственного строительного университета, д-р техн. наук, проф. *Ю. И. Густов*;  
зав. кафедрой «Технология машиностроения и ремонта» Московского государственного университета леса, д-р техн. наук, проф. *В. В. Быков*

**Зорин В. А.**

3-862 Основы работоспособности технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. А. Зорин. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 208 с.

ISBN 978-5-7695-6003-3

Рассмотрены основные процессы, вызывающие снижение работоспособности технических систем (машин): трение, изнашивание, пластическое деформирование, усталостное и коррозионное разрушение деталей машин. Приведены основные направления и методы обеспечения работоспособности машин. Описаны методы оценки работоспособности элементов и технических систем в целом.

Для студентов высших учебных заведений. Может быть полезен специалистам по сервису и технической эксплуатации автомобилей, тракторов, строительных, дорожных и коммунальных машин.

УДК 656(075.8)  
ББК 39я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Зорин В. А., 2009  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2009  
ISBN 978-5-7695-6003-3 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2009

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. Проблема обеспечения работоспособности технических систем .....</b>	<b>5</b>
1.1. Технический прогресс и надежность машин .....	5
1.2. История формирования и развития триботехники .....	7
1.3. Роль триботехники в системе обеспечения работоспособности машин .....	9
1.4. Трибоанализ технических систем .....	12
1.5. Причины снижения работоспособности машин в эксплуатации ....	14
<b>Глава 2. Свойства рабочих поверхностей деталей машин .....</b>	<b>21</b>
2.1. Параметры профиля рабочей поверхности детали .....	21
2.2. Вероятностные характеристики параметров профиля .....	24
2.3. Контакт рабочих поверхностей деталей сопряжения .....	26
2.4. Структура и физико-механические свойства материала поверхностного слоя детали .....	28
<b>Глава 3. Основные положения теории трения .....</b>	<b>32</b>
3.1. Понятия и определения .....	32
3.2. Взаимодействие рабочих поверхностей деталей .....	34
3.3. Тепловые процессы, сопровождающие трение .....	36
3.4. Влияние смазочного материала на процесс трения .....	40
3.5. Факторы, определяющие характер трения .....	42
<b>Глава 4. Изнашивание элементов машин .....</b>	<b>45</b>
4.1. Общая закономерность изнашивания .....	45
4.2. Виды изнашивания .....	48
4.3. Абразивное изнашивание .....	49
4.4. Усталостное изнашивание .....	56
4.5. Изнашивание при заедании .....	60
4.6. Коррозионно-механическое изнашивание .....	64
4.7. Факторы, влияющие на характер и интенсивность изнашивания элементов машин .....	68
<b>Глава 5. Влияние смазочных материалов на работоспособность технических систем .....</b>	<b>72</b>
5.1. Назначение и классификация смазочных материалов .....	72
5.2. Виды смазки .....	74
5.3. Механизм смазочного действия масел .....	77

5.4. Свойства жидких и пластичных смазочных материалов .....	81
5.5. Присадки .....	89
5.6. Требования, предъявляемые к маслам и пластичным смазочным материалам .....	92
5.7. Изменение свойств жидких и пластичных смазочных материалов в процессе работы .....	101
5.8. Формирование комплексного критерия оценки состояния элементов машин .....	108
5.9. Восстановление эксплуатационных свойств масел .....	111
5.10. Восстановление работоспособности машин с помощью масел .....	113
<b>Глава 6. Усталость материалов элементов машин .....</b>	<b>115</b>
6.1. Условия развития усталостных процессов .....	115
6.2. Механизм усталостного разрушения материала .....	118
6.3. Математическое описание процесса усталостного разрушения материала .....	123
6.4. Расчет параметров усталости .....	126
6.5. Оценка параметров усталости материала детали методами ускоренных испытаний .....	128
<b>Глава 7. Коррозионное разрушение деталей машин .....</b>	<b>132</b>
7.1. Классификация коррозионных процессов .....	132
7.2. Механизм коррозионного разрушения материалов .....	133
7.3. Влияние коррозионной среды на характер разрушения деталей ...	135
7.4. Условия протекания коррозионных процессов .....	138
7.5. Виды коррозионного разрушения деталей .....	140
7.6. Факторы, влияющие на развитие коррозионных процессов .....	142
7.7. Методы защиты элементов машин от коррозии .....	143
<b>Глава 8. Обеспечение работоспособности машин .....</b>	<b>146</b>
8.1. Общие понятия о работоспособности машин .....	146
8.2. Планирование показателей надежности машин .....	154
8.3. Программа обеспечения надежности машин .....	156
8.4. Жизненный цикл машин .....	158
<b>Глава 9. Оценка работоспособности элементов машин .....</b>	<b>162</b>
9.1. Представление результатов трибоанализа элементов машин .....	162
9.2. Определение показателей работоспособности элементов машин .....	166
9.3. Модели оптимизации долговечности машин .....	168
<b>Глава 10. Работоспособность основных элементов технических систем .....</b>	<b>176</b>
10.1. Работоспособность силовой установки .....	176
10.2. Работоспособность элементов трансмиссии .....	186
10.3. Работоспособность элементов ходовой части .....	193
10.4. Работоспособность электрооборудования машин .....	194
10.5. Методика определения оптимальной долговечности машин .....	196
Заключение .....	201
Список литературы .....	202

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность использования и качество функционирования машин определяются уровнем их работоспособности и надежности. Общая продолжительность простоев машин и оборудования вследствие технического обслуживания и ремонта составляет значительную долю годового фонда рабочего времени. Потери, связанные с обеспечением работоспособности машин, за период эксплуатации в несколько раз превышают их начальную стоимость.

Обеспечение надежности машин является сложной проблемой, для решения которой необходимо проведение комплекса конструкторских, технологических и организационных мероприятий на всех стадиях существования машин.

Недостаточная надежность машин снижает их производительность из-за простоев в ремонте, увеличивает материальные и трудовые затраты на их содержание, а также капитальные вложения в производственные фонды ремонтного производства и в промышленность, занятую выпуском запасных частей.

Современному специалисту в области дорожных, строительных и коммунальных машин для решения практических задач по обеспечению надежности требуется знание широкого круга вопросов. Это относится, прежде всего, к основам теории вероятностей и математической статистики, триботехнике и теории изнашивания. Важно также знать современные методы проектирования, производства и эксплуатации машин. Большинство из этих вопросов рассмотрено в данном учебнике. Основное внимание уделено вопросам обеспечения планируемого уровня работоспособности и надежности машин с учетом их специфики.

Основы работоспособности, приборы и методы исследований, а также пути повышения надежности объекта изучают в теории надежности, которая находится на стыке нескольких наук: теории вероятностей и математической статистики, теории трения и изнашивания, теории эксперимента и др. Основными задачами теории надежности являются изучение закономерностей возникновения отказов и неисправностей объекта и на базе результатов исследований разработка мероприятий, направленных на обеспечение выполнения объектом заданных функций с наименьшими затратами.

Для обеспечения надежной работы машин необходимо постоянно совершенствовать их конструкцию и технологию производства, разрабатывать и внедрять мероприятия по поддержанию работоспособности машин в эксплуатации. В связи с этим изучение научных основ обеспечения работоспособности машин должно стать неотъемлемой частью учебного процесса в технических вузах страны.

Целями освоения дисциплины являются получение студентами знаний, умений и приобретение навыков в области обеспечения работоспособности машин и прогнозирования их основных характеристик и показателей.

# ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1.1. Технический прогресс и надежность машин

С развитием научно-технического прогресса возникают все более сложные проблемы, для решения которых необходима разработка новых теорий и методов исследований. В частности, в машиностроении вследствие усложнения конструкции машин, их технической эксплуатации, а также технологических процессов требуются обобщение и более квалифицированный, строгий инженерный подход к решению задач обеспечения долговечности техники.

Технический прогресс связан с созданием сложных современных машин, приборов и рабочего оборудования, с постоянным повышением требований к качеству, а также с ужесточением режимов работы (увеличением скоростей, рабочих температур, нагрузок). Все это явилось основанием для развития таких научных дисциплин, как теория надежности, триботехника, техническая диагностика.

**Надежность** называют свойство объекта (машины в целом или отдельной сборочной единицы) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность представляет собой совокупность свойств: безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости.

**Безотказность** — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

**Долговечность** — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Эти два свойства тесно связаны между собой, поэтому очевидно, что мероприятия, направленные на обеспечение долговечности и безотказности машин, неразделимы.

**Ремонтпригодность** — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Под устранением отказа подразумевают восстановление работоспособности объекта путем ремонта (для ремонтируемых элементов) или замены (для неремонтируемых элементов) отказавшего элемента. Долговечность и ремонтпригодность являются основными свойствами, определяющими уровень надежности машин и оборудования.

**Сохраняемость** — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение, после хранения и (или) транспортирования. Это свойство более важно для машин сезонного использования и сменного рабочего оборудования: снегоочистителей, уплотняющих машин, грейферного оборудования, кусторезов и др.

Историю развития научных исследований в этом направлении можно разделить на четыре этапа.

*Первый этап* (1950-е гг.) включает в себя становление направления, формирование задач исследований. В этот период было положено начало систематического изучения долговечности и безотказности машин, сформулированы требования к их количественным показателям.

*Второй этап* (1960-е гг.) — формирование классической теории надежности. В нашей стране в этот период широкую известность получили работы Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляева, А. Д. Соловьева, Я. Б. Шора. Для этого этапа характерны начало изучения долговечности и безотказности механических систем на стадии проектирования, разработка методов расчета элементов машин с учетом статистических данных о надежности, организация систематического сбора и статистической обработки информации о надежности, нормирование показателей долговечности и безотказности.

*Третий этап* (1970-е гг.) характеризуется системным подходом к анализу надежности машин с учетом технико-экономических показателей, перспектив развития техники. В этот период были разработаны и нашли широкое применение в машиностроении методы управления долговечностью и безотказностью машин в эксплуатации, основанные на анализе статистических данных об отказах сборочных единиц с учетом затрат на обеспечение их работоспособного состояния. Большой вклад в развитие таких методов для автомобилей и дорожно-строительных машин внесли советские ученые Л. В. Дехтеринский, А. М. Шейнин, Е. С. Кузнецов, Д. П. Волков, В. С. Бочаров и др.

*Четвертый этап* (современный) предусматривает разработку и внедрение комплекса мероприятий по обеспечению работоспособности основных элементов при конструировании, изготовлении и эксплуатации машин. Эти мероприятия разрабатывают на основе результатов анализа физической сущности и закономерностей изменения процессов, происходящих в элементах машины в период ее эксплуатации.

Такой характер развития исследований долговечности машин — от статистического описания к анализу физических процессов — не случаен. Он объясняется законом перехода количественных изменений в качественные. Первые этапы развития работ в области обеспечения работоспособности изделий машиностроения были связаны с накоплением информации, ее обобщением и анализом вследствие сложности процессов изменения технического состояния машин и отсутствия инженерных методов и приборов, позволяющих зарегистрировать эти процессы. В ходе исследований ограничивались сбором статистических данных об отказах и о неисправностях сборочных единиц. Пользуясь терминологией теории систем, можно отметить, что исследования надежности машин проводились на макроуровне, без учета процессов, которые вызывают изменение технического состояния основных элементов и сборочных единиц. Это обеспечивало возможность количественной оценки долговечности без учета механизма снижения работоспособности машины.

В настоящее время при решении конкретных инженерных задач все более широко используют достижения фундаментальных естественных наук. В частности, создание оптических квантовых генераторов (лазеров), оборудования для спектрального анализа материалов, разработка таких методов, как ферро- и хроматография, открыли принципиально новые возможности для проведения экспериментальных исследований при решении задач обеспечения долговечности машин.

Современные методы физических исследований и экспериментальное оборудование, созданное в последние годы, позволяют не только регистрировать процессы изменения технического состояния элементов машин, но и оценить влияние основных факторов на характер протекания этих процессов. Таким образом, созданы необходимые условия для анализа долговечности элементов машин на микроуровне, что позволяет более строго обосновать мероприятия по обеспечению их работоспособности.

Исследование процессов изменения технического состояния машин является предметом новой дисциплины — триботехники.

## **1.2. История формирования и развития триботехники**

Триботехника является областью новой научной дисциплины — трибологии, изучающей взаимодействие рабочих поверхностей деталей при их относительном перемещении. Слово «трибология» произошло от греческого *tribos* — трение. Объектом изучения триботехники служат механические системы, узлы трения машин,

функционирование которых сопровождается процессами трения и изнашивания. Предмет исследования составляют процессы трения, изнашивания, смазывания элементов машин, т.е. процессы, вызывающие изменение технического состояния изучаемых систем.

Цель исследований триботехники заключается в разработке принципов, методов и технических средств обеспечения работоспособности машин. Триботехника (трибоника) как самостоятельное научное направление, сформировалась в 50—60-е гг. XX в., т.е. в период создания мощных двигателей, а также ужесточения режимов работы машин.

Теоретической базой триботехники являются физика (теория трения), химия и математическая физика, инструментом исследования — методы, применяемые в естественных науках, а также математический аппарат.

Первые зарегистрированные количественные исследования трения были проведены Леонардо да Винчи в середине XV в. Его экспериментальный подход по существу аналогичен подходу, который используют в настоящее время при проведении простых лабораторных работ по измерению силы и момента трения.

Важным шагом на пути развития теории трения и изнашивания явилось открытие основных законов классической механики, сделанное И. Ньютоном в конце XVII в. Эти законы явились основой для разработки правил трения твердых тел без смазочного материала (сухого трения), сформулированных Г. Амонтоном (1699) и Ш. О. Кулоном (1785).

В конце XIX в. Н. П. Петровым и Б. Тауэром различными путями было доказано существование устойчивых пленок смазывающей жидкости в радиальных подшипниках. В начале XX в. одновременно у Дж. Мичелла (Австрия) и Д. Кингсбери (США) возникла идея создания подшипника с самоустанавливающимся вкладышем. Эти работы были первыми научными исследованиями с практическим инженерным приложением.

Дальнейшие исследования процессов трения и изнашивания, проведенные советскими учеными П. А. Ребиндером, В. Д. Кузнецовым, Л. К. Зайцевым, И. В. Крагельским, Д. Н. Гаркуновым, М. М. Хрущевым, Б. И. Костецким и зарубежными исследователями Ф. Боуденом и Д. Доусоном (Великобритания), Г. Флайшером (ГДР), Э. Рабиновичем (США) и другими, позволили раскрыть механизм и физическую сущность процессов взаимодействия контактирующих поверхностей при наличии смазочного материала и без него.

Результаты этих исследований послужили теоретическими предпосылками для математического описания явлений трения и изнашивания. Часть из них имела прямое инженерное приложение.

### 1.3. Роль триботехники в системе обеспечения работоспособности машин

Триботехника изучает процессы взаимодействия рабочих поверхностей деталей в целях разработки практических мероприятий по повышению работоспособности машин.

Работоспособное состояние машин закладывается на стадии конструирования. Оно зависит от конструкции, применяемых материалов, защитных покрытий, смазочных материалов и других факторов. Большое значение также имеют применяемые при проектировании методы расчета износостойкости деталей и сопряжений.

Работоспособность машин обеспечивается и на стадии производства, зависит от применяемых видов обработки деталей (механической или химико-термической), технического уровня и состояния станочного парка, режимов обкатки.

Возможности реализации заложенной в машине работоспособности в процессе эксплуатации определяются принятой системой и качеством технического обслуживания и ремонта, квалификацией обслуживающего персонала, воздействием внешней среды.

Таким образом, обеспечение работоспособности является комплексной проблемой, для решения которой требуется проводить новые организационно-технические мероприятия при проектировании, производстве и эксплуатации машин.

Для наиболее полного учета влияния всех факторов при анализе работоспособности машин необходимо применять системный подход. С этой целью сопряжение, сборочную единицу и машину в целом рассматривают как механические системы. Основными свойствами любой системы являются организованность, управляемость и относительность.

**Организованность** предусматривает наличие определенной структуры, упорядоченность элементов, входящих в состав системы.

**Управляемость** — способность системы однозначно изменяться под воздействием определенных факторов.

**Относительность** (иерархичность) — это положение, при котором любая система является подсистемой более крупной системы. Например, бульдозер может быть представлен как система, если рассматривается его надежность, или как подсистема, если рассматривается готовность парка машин. Из свойства относительности систем вытекают следующие законы:

- системы на каждом уровне принадлежат к различным по степени сложности классам;
- все теоретические и эмпирические закономерности, полученные на нижнем уровне, справедливы для любого более высокого уровня сложности системы данного класса;

• чем выше уровень сложности системы, тем большее число неизвестных элементов (переменных параметров) и закономерностей требуется для ее описания.

Эти законы лежат в основе методологии исследования и управления работоспособностью машин.

Поскольку с повышением уровня сложности системы (табл. 1.1) увеличивается число переменных параметров, а следовательно-

Таблица 1.1

**Иерархическая структура парка дорожных и строительных машин как системы**

Уровень сложности подсистемы	Стадия		
	конструирования	производства	эксплуатации
I Деталь	Расчет износо-стойкости и долговечности	Обоснование методов обработки	Обоснование методов восстановления. Расчет ресурса
II Сопряжение	Подбор материалов, обоснование параметров. Расчет долговечности	Обоснование методов сборки, приработки	Экспертиза отказов, обоснование периодичности управляющих воздействий
III Сборочная единица	Расчет показателей надежности; обоснование режимов работы. Расчет периодичности технического обслуживания и ремонтов	Обеспечение при сборке установленных норм точности и промышленной чистоты	Расчет потребности в запасных частях. Расчет оптимальной периодичности управляющих воздействий
IV Машина	Расчет показателей надежности. Определение видов технического обслуживания и ремонтов	Обоснование режимов и продолжительности обкатки; обеспечение промышленной чистоты	Оптимизация видов и периодичности управляющих воздействий с учетом условий эксплуатации
V Парк машин	Расчет потребности в запасных частях и эксплуатационных материалах	—	Расчет комплексных показателей надежности — коэффициентов готовности и технического использования

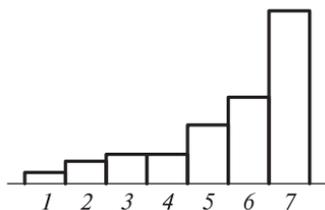


Рис. 1.1. Диаграмма, характеризующая структуру экономического эффекта от применения методов триботехники:

1 — уменьшение потерь на трение на 2%; 2 — сокращение капитальных вложений на 3%; 3 — уменьшение расхода запасных частей на 5%; 4 — сокращение трудовых ресурсов на 5%; 5 — уменьшение расхода топлива и смазочных материалов на 15%; 6 — уменьшение затрат на техническое обслуживание и ремонт на 25%; 7 — повышение долговечности машин на 45%

но, и степень неопределенности ее состояния, возрастает роль вероятностных методов при управлении долговечностью. На IV и V уровнях при решении задач обеспечения долговечности широко используют статистические и технико-экономические методы.

Разработка мероприятий по обеспечению долговечности машин на остальных трех уровнях должна базироваться на результатах исследований процессов, происходящих в элементах машин в период эксплуатации. К таким процессам относятся изменение параметров деталей вследствие изнашивания; старение, усталость материалов деталей; изменение параметров деталей при наличии пластических деформаций и физико-механических свойств материалов деталей под влиянием окружающей среды в период эксплуатации (разупрочнение, наклеп, коррозия, снижение эластичности резинотехнических изделий и т.п.).

Все эти процессы ведут к снижению работоспособности деталей машин. Они являются следствием физико-химических процессов: теплообмена, взаимодействия контактирующих поверхностей деталей при работе машины, изнашивания, истечения смазочного материала, окисления и коррозии материалов.

Для разработки мероприятий по обеспечению долговечности машины на всех этапах ее существования необходимо иметь полную информацию о физико-химических процессах, происходящих в элементах машины во время эксплуатации.

Выявление закономерностей изнашивания позволяет рассчитать ресурс деталей, определить периодичность проведения регулярных работ. Знание процессов старения смазочного материала дает возможность определить оптимальную периодичность его замены, обеспечить рациональный режим трения деталей. Установление характера процессов взаимодействия рабочих поверхностей деталей позволяет правильно рассчитать профиль их

рабочих поверхностей, подобрать материалы деталей и рациональные режимы приработки.

Общий экономический эффект от внедрения результатов исследований в области триботехники в масштабах страны составляет миллиарды рублей (рис. 1.1).

Системный анализ проблемы обеспечения надежности машин показывает, что для ее успешного решения необходимо, во-первых, разработать единый комплекс мероприятий по обеспечению работоспособности изделий на стадии их производства, конструирования и эксплуатации, объединив таким образом усилия людей, работающих в соответствующих сферах; во-вторых, осуществить комплексное применение статистических (на IV и V уровнях сложности) и физико-химических (на I—III уровнях) методов исследования.

### 1.4. Трибоанализ технических систем

Анализ технической системы с позиций триботехники позволяет выявить совокупность факторов, определяющих процесс изменения технического состояния элементов машины, и наметить основные направления исследований по обеспечению надежности. По результатам трибоанализа технической системы построена схема, показанная на рис. 1.2. На схеме приведены основные группы факторов, определяющих долговечность сопряжения: показатели, характеризующие исходное состояние системы (блок I); показатели, определяющие условия работы и режим взаимодействия деталей (блок II); показатели, характеризующие изменение состояния элементов системы в процессе работы (блок III). Стрел-

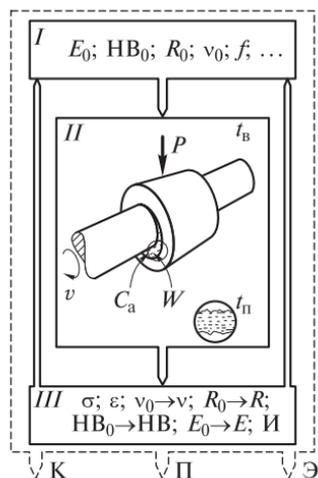


Рис. 1.2. Схема трибоанализа технической системы I—III уровней сложности:

$E_0$  и  $E$ ,  $HV_0$  и  $HV$ ,  $R_0$  и  $R$ ,  $v_0$ ,  $v$  — соответственно исходные и рабочие значения модуля упругости, твердости поверхности, высоты микронеровностей и вязкости смазочного материала;  $f$  — коэффициент трения;  $\sigma$  — внутренние напряжения;  $\varepsilon$  — остаточные деформации; И — износ;  $P$  — нагрузка;  $v$  — скорость;  $t_{в}$  и  $t_{п}$  — температура воздуха и поверхности трения соответственно;  $W$  — влажность;  $C_a$  — концентрация абразивных частиц; К, П, Э — стадии конструирования, производства и эксплуатации соответственно

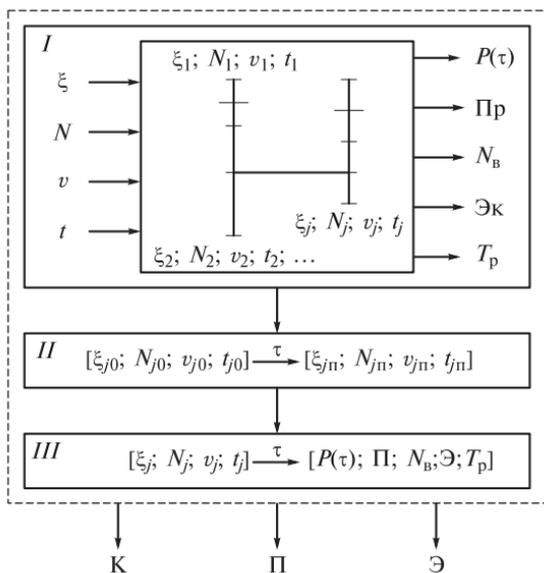


Рис. 1.3. Схема трибоанализа технической системы III и IV уровней сложности:

$\xi_j, N_j, v_j, t_j$  — соответственно зазор, нагрузка, скорость и температура элемента  $j$ -го звена в исходном (индекс «0») и предельном (индекс «п») состояниях;  $P(\tau)$  — вероятность безотказной работы; Пр — производительность;  $N_b$  — мощность; ЭК — экономичность;  $T_p$  — ресурс;  $\tau$  — время работы механической системы; остальные обозначения см. на рис. 1.2

ками показано взаимодействие входных и выходных параметров системы.

Результаты трибоанализа позволяют разработать комплекс мероприятий по обеспечению работоспособности деталей и сопряжений машин на стадиях конструирования К, производства П и эксплуатации Э; выбрать материалы, обеспечивающие заданную долговечность деталей и сопряжений; обосновать методы изготовления деталей и режимы их обработки, а также периодичность проведения управляющих воздействий в эксплуатации, направленных на поддержание работоспособности машины. Для технической системы III и IV уровней сложности разработка мероприятий по обеспечению работоспособности должна базироваться на результатах исследования системы I—III уровней. Для учета дополнительных факторов, определяющих надежность системы более высокого уровня сложности (III и IV уровни), необходимо провести трибоанализ системы в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.3.

При анализе факторов, определяющих долговечность сложной системы, следует учитывать характер взаимодействия всех ее эле-

ментов в процессе функционирования. Для этого в описание механической системы должны входить результаты анализа ее структуры (блок I) с обозначением параметров режимов работы каждого структурного элемента. Следующим этапом трибоанализа является оценка влияния изменения состояния и связанного с этим изменения режимов работы каждого из элементов на условия работы и долговечность остальных элементов системы (блок II). На заключительном этапе устанавливают зависимости показателей долговечности и функционирования всей системы (блок III) от изменения технического состояния и режимов работы отдельных элементов.

Используя эти зависимости, можно решить две важнейшие задачи машиностроения: определение предельного состояния элементов машины и прогнозирование изменения технического состояния машины и ее ресурса.

Приведенная на рис. 1.3 схема трибоанализа механической системы является основой для разработки систем диагностирования технического состояния машин и отдельных сборочных единиц, разработки мероприятий по обеспечению работоспособности комплектующих изделий и машины в целом.

## 1.5. Причины снижения работоспособности машин в эксплуатации

Состояние любой технической системы (машины, сборочной единицы или сопряжения) характеризуется совокупностью ее внутренних свойств в определенный момент времени.

Различают следующие основные состояния технической системы: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное.

**Исправным** называют состояние системы, при котором она соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неисправным** является состояние системы, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Работоспособным** называют состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неработоспособным** является состояние системы, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность системы выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Предельным** называют состояние системы, при котором ее дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление ее исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

При оценке технического состояния дорожных и строительных машин и их конструктивных элементов часто применяют понятие **предотказного** состояния системы, при котором ее дальнейшая эксплуатация в течение межремонтного периода может привести к возникновению отказа. **Отказ** — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние называется **ресурсом**.

Календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновление после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние называется **сроком службы**. Ресурс и срок службы являются основными показателями долговечности дорожных и строительных машин.

Понятие «надежность» охватывает многие аспекты, связанные с характеристикой состояния технических систем. Вместе с тем это понятие ограничено, так как не учитывает физическую сущность состояний, их разнообразие.

В общем случае техническая система может находиться в различных состояниях. Число состояний зависит от количества элементов системы, ее функционального назначения, пределов изменения показателей работоспособности. Момент, в который происходит переход системы из одного состояния в другое, является случайной величиной.

Поскольку состояние технической системы определяется состоянием ее конструктивных элементов, надежность функционирования системы в целом также зависит от надежности составляющих ее деталей и от количества возможных состояний каждой из них. Деталь может находиться в одном из двух состояний — работоспособном или неработоспособном. Отказ сборочной единицы наступает в случае перехода любой из деталей в неработоспособное состояние. При увеличении числа  $n_k$  составляющих систему элементов от 2 до 14 вероятность ее безотказной работы уменьшается, а число  $m$  возможных состояний системы резко воз-

Рис. 1.4. Зависимость вероятности  $P(\tau)$  безотказной работы и числа  $m$  возможных состояний технической системы от числа  $n_k$  конструктивных элементов (для каждой детали  $P(\tau) = 0,9$ )

