



МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

УДК 621-192:504.1

Н.А. МАХУТОВ, чл.-кор. РАН; В.В. ЗАЦАРИННЫЙ, канд. техн. наук
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук; Н.Н. ИШИН, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПОДХОДЫ, МОДЕЛИ, МЕТОДЫ

Показан взаимопроникающий характер понятий «надежность», «безопасность», «риск» в общей структуре понятий, определяющих качество технической системы. Рассмотрены вопросы категоризации и оценки техногенных рисков объектов технического регулирования, опасных производственных объектов, критически и стратегически важных объектов. Представлены методы расчета реальной надежности машин, основанные на моделировании отказов (предельных состояний) машины как многоуровневой системы и воспроизведении зависимого поведения ее компонентов. Приведены классификация и модели ресурсных расчетов, методология оценки технического состояния и вибромониторинга трансмиссионных узлов мобильной техники. Описаны подходы к решению задач обеспечения надежности и безопасности технических систем, над которыми работают специалисты Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси.

Ключевые слова: надежность, безопасность, риск, диагностика, расчет, моделирование, прогнозирование, обеспечение

Введение. Безопасность является наиболее важной характеристикой современных технических систем. Объекты, не удовлетворяющие нормативным требованиям безопасности, не допускаются к эксплуатации. Надежность напрямую не связана с безопасностью системы. ненадежные системы могут быть безопасными, если их отказы не приводят к опасным событиям. Вместе с тем безопасность предусматривает анализ отказов и их последствий. Для количественных оценок опасности используется понятие риска. Риск трактуется как вероятностная мера возникновения опасностей определенного класса, или размер возможного ущерба (потерь, вреда) от нежелательного события, или комбинация этих величин. В стандарте ГОСТ Р 51897-2002 дано определение риска как сочетания вероятности события и его последствий, при условии, что существует хотя бы одно негативное последствие этого события.

Во введении в ГОСТ Р 51901.2-2005 «Менеджмент риска. Системы менеджмента надежности» указывается: «Поскольку менеджмент риска является частью менеджмента надежности, то настоящий стандарт поможет разработчикам требований управления рис-

ком, оценки и анализа риска выделить этапы системы менеджмента надежности, к которым эти требования относятся, и более четко сформулировать цели, задачи и программу менеджмента риска».

Таким образом, рассматриваемые понятия надежности, безопасности и риска носят «взаимопроникающий» характер и должны рассматриваться в комплексе. Сказанное иллюстрирует рисунок 1, где показана структура основных свойств технической системы, определяющей ее качество.

В большинстве стран в настоящее время принята концепция «приемлемого риска» (*ALARA — as low as risk acceptable*), позволяющая использовать принцип «предвидеть и предупредить». Это является признанием того, что полностью исключить риск невозможно и придает определенный экономический характер вопросам обеспечения надежности и безопасности технических систем.

Рисунок отражает тот факт, что понятие «Надежность» имеет характер «крыши», под которой помимо собственных свойств «Надежности» располагается также «Риск». «Качество» — наиболее широкая крыша. Она охватывает «Надежность», «Риск» и «Экономичность».

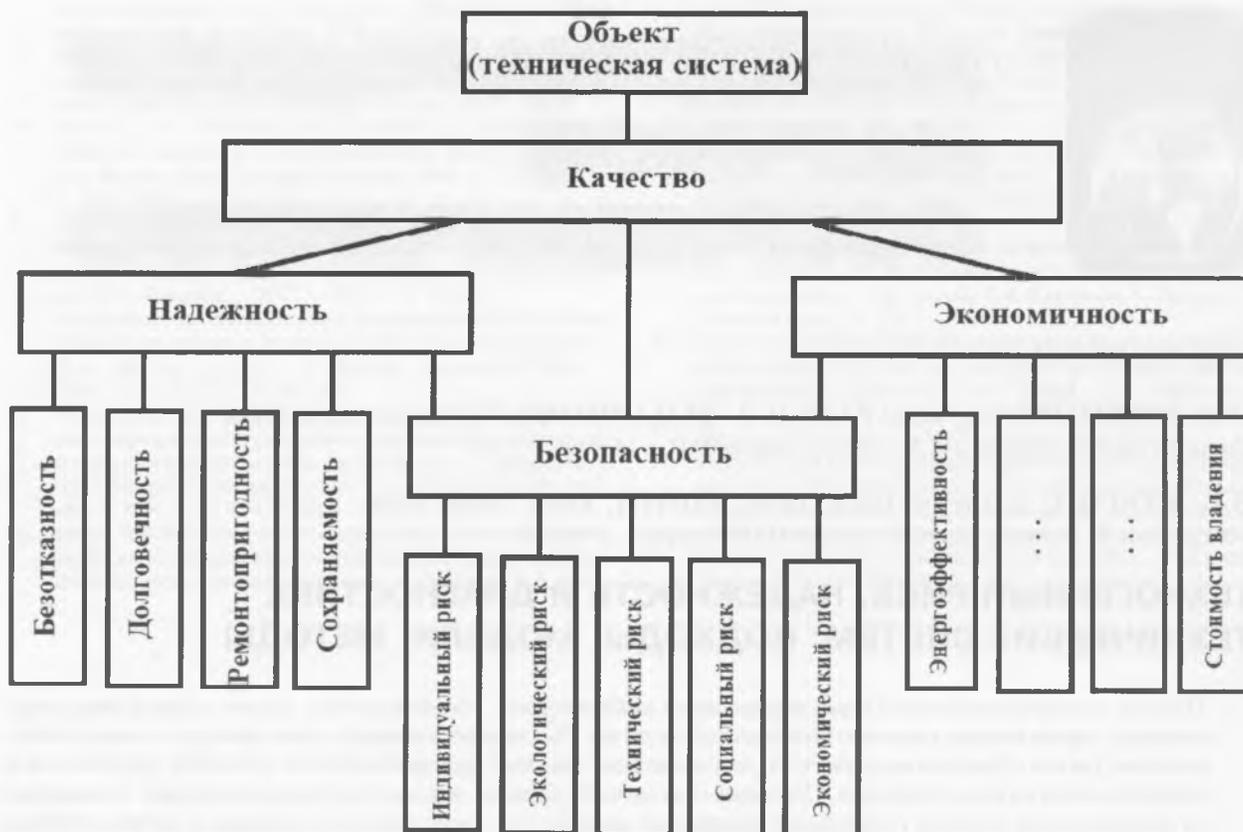


Рисунок 1 — Основные свойства технической системы

В статье рассмотрены вопросы оценки, расчета и обеспечения надежности и безопасности технических систем, включая аспект технической диагностики, над которыми работают специалисты Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, в том числе в рамках совместного проекта, подержанного российским и белорусским фондами фундаментальных исследований.

Техногенный риск. В последние два десятилетия в мире сохраняется устойчивая тенденция роста количества чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с постоянно увеличивающимися масштабами материальных ущербов. Мировое сообщество живет в сфере всех вышеупомянутых опасных процессов, высоких рисков, и всем странам и в будущем предстоит жить в мире с возрастающими рисками. В наших странах есть объекты, которые представляют большую опасность и продолжают эксплуатироваться. Действуют объекты, которые выработали свои назначенные ресурсы; по ним надо принимать решения и продолжать эксплуатацию; объекты, которые уже подверглись воздействию аварий, надо восстанавливать и продолжать их жизненный цикл. На сегодняшний день накопилось много новой информации по опасностям, вызовам, угрозам, чрезвычайным ситуациям и катастрофам, и в связи с этим необходимо вычленить проекты и задачи стратегического плана в различных стра-

нах, проанализировать и учесть накопленный научный и практический материал.

На фоне этой огромной техносферы следует разумно распоряжаться информацией по проблемам безопасности, использовать соответствующие знания в реализуемых проектах. Конечная цель — снижать формирующиеся риски до приемлемых уровней.

Примеры катастроф. Национальная катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС. По этой проблеме работал целый ряд комиссий — технических, правительственных и парламентских. В этой катастрофе встретились и экономика, и человеческий фактор, и политика, и природа в определенной мере и в определенном взаимодействии. Результатом стала тяжелая авария, которую в полной мере очень будет трудно преодолеть. Она обойдется России по первичному ущербу порядка 50 млрд руб., а с учетом вторичных и косвенных ущерб будет составлять около 250 млрд рублей. Многие решения после этой аварии и восстановления ГЭС будут уже другими, эта авария многому научила.

Из анализа аварии известно, что в машинном зале на станции сорвалась крышка второго гидроагрегата. Силы, которые действовали на эту крышку, по оценкам составляли примерно 20 тыс. т. Активная часть аварии длилась примерно 4,6 секунды. Такого рода авария не проста как для анализа, так и для принятия решений. Управлять станцией в этот короткий отрезок времени достаточно сложно. В ряде случаев тяжелых катастроф это практически невозможно.

Похожая авария была несколько десятилетий назад. На одном из химических предприятий на автоклаве тоже сорвалась крышка. Она пролетела через цех, сорвала колонны, крыша цеха упала, погибли люди. Та же самая крышка. Если в первом случае усилие было 20 тыс. т, то во втором на крышку действовало усилие около 1000 т.

Атомные реакторы. Такие объекты сегодня работают во многих странах. На водо-водяном энергетическом реакторе ВВЭР-1000 тоже есть крышка, есть аналогичные болты, шпильки. Давление там существенно больше, хотя диаметр шпилек меньше. Там развивается усилие на крышку порядка 40 тыс. т. Можно себе представить полет крышки и его последствия. Ущерб может составить не миллиарды, а триллионы рублей. Во всех случаях это один и тот же источник катастрофы. Примерно один механизм аварии, хотя сами объекты, последствия и ущербы чрезвычайно (в сотни и тысячи раз) разные.

Первоочередной вывод, который необходимо сделать: для предотвращения разбора аварий и катастроф нужно знать ответы на два вопроса — источник соответствующей аварии или катастрофы, с одной стороны, и причины, с другой. Источник — это отрыв крышки и разрушение шпилек, которыми крепилась эта крышка. Причин этой катастрофы чрезвычайно много. Нет одной причины, это сочетание причин, и в этом смысле задача, которая стоит перед надзорными органами, конструкторами, эксплуатирующими компаниями, заключается в том, чтобы знать критические элементы, критические точки, критические ситуации, сценарии такого рода аварий и катастроф, тогда с авариями такого рода можно бороться.

Каждая из таких тяжелых аварий на уникальных объектах очень многому учит, заставляет иногда менять и государственную политику, и политику в подготовке кадров, и в надзоре. В последнее время на ряде конференций, совещаний, заседаний все чаще начинают говорить о защищенности критически и стратегически важных объектов от тяжелых катастроф с использованием критериев стратегических рисков. Эти катастрофы на виду, они обладают экстремальной трагичностью и большими ущербами. Подобных тяжелых катастроф мировое сообщество пережило за прошедшие годы немало. Это «достижение» последних 20—30 лет — новая ситуация, с которой человечество раньше не сталкивалось.

Катастрофы на атомных станциях Три-Майл-Айленд и Чернобыльской АЭС. Каждая из таких катастроф меняет взгляд на атомную энергетику, политику, на людей, на их самочувствие и на взгляды на будущее. Специалисты многому учатся на этих авариях и катастрофах, но многое иногда не учитывается. Например, после Чернобыльской катастрофы большая советская делегация ученых была в Японии и хотела поделиться опытом с японцами о том, что можно ожидать от эксплуатации атомных станций в Японии. Однако японцы категорически от-

казались широко обсуждать эту проблему, ссылаясь на то, что они уже и так пережили Хиросиму и Нагасаки, и японская нация не должна еще раз «окунуться в этот страшный, радиационно опасный мир; и они сделают все, чтобы этого больше с ними не случилось. Попытки убедить их в том, что в техногенном мире современные риски не могут быть нулевыми, не увенчались успехом. К сожалению, жизнь подтвердила, что проблема безопасности, в том числе в ядерной энергетике, существует.

Трагедия «Фукусимы». Японцы, строя атомную энергетику в своей стране целиком положились на передовые американские технологии, на конструкции их АЭС, тем самым как бы возложив всю ответственность в этой сфере на американцев и полагая, таким образом, что они будут в определенной степени защищены. Но оказалось, что даже такая, казалось бы, разумная линия тоже не может застраховать от крупных аварий.

Аварии и катастрофы, которые по своим ущербам являются тяжелыми. Такие аварии неизбежны. К ним можно отнести аварии на атомных лодках «Трешер», «Комсомолец» и «Курск». Здесь также много информации для анализа и обобщений.

Когда произошел взрыв в торпедном отсеке АПЛ «Курск», оказалось, что на реакторную установку на лодке воздействовали усилия с ускорением порядка 600 g, хотя аварийная ситуация рассчитывалась на 30 g; то есть оказалось, что решения, которые были заложены при очень тщательном проектировании, контроле, испытаниях позволили избежать тогда ядерной катастрофы на АПЛ «Курск», хотя при том взрыве были реализованы все экстремальные воздействия.

Другой пример тяжелой аварии — «знаменитая» катастрофа на железнодорожном транспорте и магистральном продуктопроводе под Уфой, когда погибли 600 человек. Экспертная комиссия, рассматривая это чрезвычайное явление, выяснила, что все началось первоначально с некачественно выполненных ремонтных работ, с повреждений трубопровода транспортными средствами; отсюда началось постепенное и потом полное разрушение, истечение широких фракций легких углеводородов, что закончилось объемным взрывом. Таким образом, небольшие сами по себе воздействия и дефекты, которые встречаются достаточно часто в реальной жизни, оборачиваются в ряде случаев тяжелыми катастрофами.

Еще один пример — подрыв «Невского экспресса». Впоследствии специалистами ОАО «РЖД» и учеными была построена модель, которая показала, как все происходило во времени: момент взрыва, как поезд сходил с рельсов, как движущиеся вагоны повреждали рельсы, как травмировались люди, отрывались сиденья. Когда эту аварию проанализировали, то стало ясно, что надо в принципе по-другому проектировать и вагоны, и стыки.

Чрезвычайные ситуации с космической техникой: шаттлы «Челленджер» и «Колумбия» в Соединенных

Штатах, ракетная лунная система Н-1 в СССР. Если при испытаниях и доводке этой техники повторяются три катастрофы одинакового типа, то крупные проекты закрываются. Их нельзя реализовывать в дальнейшем, что в частности, было с системой Н-1. Такого рода аварии, как правило, сразу не отражаются в нормативных материалах, в законодательных актах, нет специалистов по этим вопросам, и каждый раз приходится создавать специальные комиссии, принимать решения и учиться всему позже.

Здесь необходимо отметить следующее. Около 50 аварий в России и в Советском Союзе в космической технике закончились тяжелыми катастрофами, и вплоть до последнего времени ни в одном из случаев не было повторения источников и причин этих аварий. Настолько тщательно тогда все при анализе этих аварий исследовалось и принимались надлежащие конкретные решения, что аварии возникали уже по другим причинам.

Катастрофа в Бхопале (Индия) в целом дала импульс к принятию ряда международных директив, которые поменяли наш взгляд на безопасность.

Авария с буровой платформой в Мексиканском заливе также вызвала большой резонанс. Мексиканский залив — это сравнительно простые условия для эксплуатации такого рода уникальных объектов, огромный опыт был у компании ВР. Сейчас, когда будут реализовываться уникальные проекты освоения Сахалина, шельфа Северного Ледовитого океана, там будут уже другие условия, куда более жесткие и сложные для анализа и предотвращения аварий и катастроф. И того опыта, который накоплен для других регионов мира, явно не достаточно. Возможно предстоит принципиально менять технологии, отказавшись от платформ как таковых, сделав платформы только для бурения, а последующие технологии переносить под воду, лед. Подобные проблемы сейчас разрабатываются учеными и специалистами, и это, конечно, в определенной степени позволит снизить предстоящие риски.

Нефтегазохимия. Эта отрасль также не избежала тяжелых аварий. Здесь можно упомянуть большую сибирскую трагедию, когда возникшая в трубопроводе маленькая трещина сожгла целое предприятие в Нижневартовске.

Уроки катастроф для России и задачи на будущее. Итогом рассмотренных аварий и катастроф является то, что сейчас Российская академия наук, Ростехнадзор, МЧС России и другие ведомства вместе попытались с точки зрения прогнозирования увидеть, какое положение будет складываться в дальнейшем с той техносферой и инфраструктурой, в которой мы живем и будем жить в будущем. В России есть целый ряд Федеральных законов по проблемам безопасности. На рисунке 1 в соответствии с законом о техническом регулировании обозначены существующие *объекты технического регулирования* (ОТР) и в соответствии с законом о промышленной безопасности — *опасные производ-*

ственные объекты (ОПО). Советом Безопасности Российской Федерации по предложению Российской академии наук и МЧС России также выдвинуты в качестве объектов рассмотрения, так называемые, *критически важные объекты* (КВО). В самые последние годы, после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, была поставлена проблема о *стратегически важных объектах* (СВО).

Определение критически важного объекта присутствует в документах Совета Безопасности: это объект, который при аварии или катастрофе может нарушить жизнедеятельность региона или страны, вызвать ухудшение жизни масс людей, и на котором достаточно трудно преодолеть последствия аварии.

В качестве стратегически важных объектов могут быть такие объекты, которые нарушают жизнедеятельность страны в целом, групп государств и континентов. Аварии типа Чернобыльской, мексиканская трагедия, взрыв на АЭС «Фукусима» могут быть отнесены к такого рода авариям. Сейчас на основе обобщения большой информации по всем видам аварий разработана классификация аварий, которой нужно руководствоваться [1, 2]. Есть объектовые, локальные, местные, региональные, национальные, глобальные и планетарные катастрофы. Для каждого типа аварии или катастрофы существуют объекты, которые имеют свои характерные последствия и ущербы. Указанные объекты — ОТР, ОПО, КВО и СВО обозначены на рисунке 2. К ним относятся атомные станции, подводные лодки, ракетно-космические системы, системы сжиженного природного газа, гидроэлектростанции, магистральные трубопроводы, уникальные сооружения. С левой стороны рисунка показаны ущербы, которые возникают при этих авариях.

Ущерб (логарифмическая шкала) варьируются в пределах от тысяч (10^3) долларов на одну аварию и до миллиардов (10^9) — сотен миллиардов (10^{12}) долларов.

Частоты возникновения (периодичность) аварий и катастроф показаны с правой стороны рисунка 2. Подобные аварии и катастрофы могут возникать с различной периодичностью: через месяцы или один раз в десятилетия. Такие графики были получены РАН достаточно давно [1—3], когда в 2000 году произошла национальная катастрофа с АПЛ «Курск». Первоначально казалось, что следующая подобная тяжелая катастрофа произойдет через более длительный, чем десятилетний период. Но Саяно-Шушенская катастрофа возникла примерно через 10 лет. Эта точка легла в ту же область графика. Графически представленные данные на рисунке 2 говорят о той статистике аварий, с которой придется жить и дальше. Улучшить ее пока не удастся, она будет, наверное, существовать, хотя стремление к тому, чтобы понизить риски (а риски — это произведение параметров одной шкалы на параметры другой) очень важно, так как хотя тяжелые аварии и катастрофы редки, но они имеют многомиллиардные ущербы. Они существенно опаснее, возникают не каждый

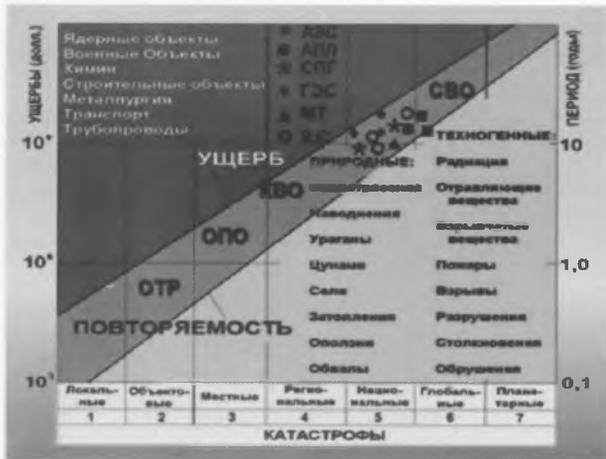


Рисунок 2 — Ущерб и периодичность тяжелых катастроф на объектах инфраструктуры

день, но ущербы от них и риски, соответственно, велики. Именно стратегически важные объекты (СВО) и создают стратегические риски. Поэтому они в первую очередь и подлежат определению, регулированию, надзору и управлению. В последние годы Совет Безопасности подробно рассматривал эти вопросы, они получили отражение в стратегии национальной безопасности, в основах стратегического планирования развития России.

На рисунке 3 по временной шкале (1980—2010 гг.) отложено изменяющееся относительное число N природных и техногенных аварий и катастроф. Рисунок 3 также отражает новую реальность современного мира — появившиеся так называемые террористические угрозы. Риски от них сейчас пока очень малы по сравнению с другими природно-техногенными рисками, но скорость нарастания этих угроз, к сожалению, в 5-6 раз выше, чем для других катастроф, и это тоже подлежит специальной оценке.

Первое, что приходится сделать для определения рисков, — это классифицировать и категоризировать сами объекты инфраструктуры, для которых определяются риски [1, 2]. На рисунке 4 изображены упомянутые выше группы объектов.

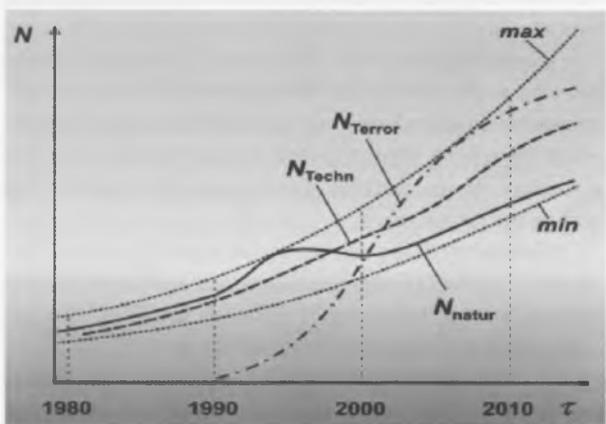


Рисунок 3 — Изменение числа чрезвычайных ситуаций различного характера

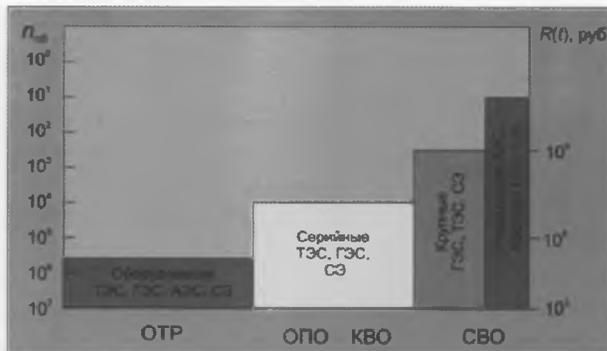


Рисунок 4 — Структура потенциально опасных объектов инфраструктуры

Они могут быть охарактеризованы определенными показателями: числами объектов $n_{об}$ и рисками $R(t)$, зависящими от времени t .

Таким образом, можно каждому объекту из групп ОТП, ОПО, КВО, СВО приписать свою численную характеристику, класс аварий и катастроф по рисунку 2; ущерб, периодичность по рисунку 2 и риск по рисунку 4. По ним через риски можно определить потенциальную опасность и для людей, для техносферы и природной среды. И в этом смысле будет проведена не просто качественная, но и количественная категоризация объектов.

Задачи, которые предстоит решать конструкторам, инженерам, технологам, надзорным органам для создания объектов с приемлемыми рисками, укладываются в определенные требования к их прочности, жесткости, ресурсу, надежности, живучести, безопасности, рискам и защищенности [3—6]. Они представлены на рисунке 5.

В верхней части схематично показано, что появилась новая фундаментальная проблема — обеспечение защищенности объектов от тяжелых катастроф на базе критериев риска. Для них — ОТП, ОПО, КВО, СВО — будут определены свои параметры, свои критерии, свои риски, свои нормативно-технические документы, будут подготавливаться свои специалисты. Такая работа сейчас ведется и будет осуществляться в рамках новых законов, регламентов, сводов. Сами риски $R_i(t)$ для i -го объекта при этом являются функцией времени t . Они будут нарастать для разных типов объектов по различным траекториям. Если отходить от обычных объектов ОТП и ОПО к критическим и стратегически важным объектам, то там сценарии и траектории рисков будут обладать существенной неопределенностью, сложностью [1, 2]. При этом новая задача состоит в том, чтобы для всех объектов, имеющих в наличии, использовать некоторые универсальные соотношения для оценки их безопасности и рисков.

На рисунке 6 (вторая строчка) приведено выражение, которое впервые предлагается использовать в России для определения рисков; оно, возможно, с течением времени будет предложено для практической деятельности через Совет Безопас-



Рисунок 5 — Общая структура обеспечения защищенности объектов инфраструктуры

ности, надзорные органы, МЧС России, РАН. Основная идея заключается в том, что интегральные риски $R_i(t)$ должны быть менее приемлемых $[R_i(t)]$. А чтобы достичь этого условия приемлемости, нужно разработать целый комплекс мероприятий, который показан в правой части выражения с соответствующими затратами $Z(t)$, которые связаны с рисками. Это определено новая идеология, и с ней придется жить и действовать.

Вся нормативная база, которая была ранее в Советском Союзе (ГОСТы, СНИПы, нормы), сейчас заменяется Федеральными законами и регламентами. Но существенным обстоятельством является то, что стратегически важные объекты и критически важные объекты еще не подкреплены современной и стройной правовой и нормативной базой. Проблемы защищенности от тяжелых катастроф, как это было показано на примере атомной энергетики, сейчас выходят на первый план. Они состоят из вопросов естественной защищенности, функциональной защищенности, охранной защищенности и жесткой защищенности. Это все должно рассматриваться вместе для разных объектов и их сочетаний. Только тогда можно говорить о том,

что проанализированы все опасные объекты, выстроены барьеры и системы защиты, использованы комплексные подходы к построению систем защиты и этим самым снижены опасность и риски функционирования объектов.

Жизненный цикл объектов остается по-прежнему важнейшим элементом безопасности, и все стадии цикла (проектирование, изготовление, эксплуатация, вывод из эксплуатации) должны определяться по соответствующим наборам количественных показателей рисков. Такого рода задача сейчас стоит перед наукой, экономикой, государственным управлением и надзором.

Сейчас в России выстраивается такая цепочка функций государства: Совет Безопасности, научные исследования и разработки, фундаментальные исследования академии наук [3—6], научно-техническая подготовка специалистов Минобрнауки для обоснования безопасности и рисков. На отраслевом уровне эти проблемы решают МЧС России, Ростехнадзор, Росстандарт и другие ведомства. Но основой для всех остается стратегия национальной безопасности и стратегия планирования в России.

Вышеизложенные подходы к определению рисков и обеспечению безопасности были по поручению Совета Безопасности обобщены примерно в 35 томах уникальной серии «Безопасность России». В настоящее время выпуск томов этой серии продолжается.

Аналогичные работы с участием России и Беларуси развиваются в последнее время в рамках программ Межгосударственного сотрудничества с другими государствами-участниками СНГ [7, 8]. Выпущено 4 тома совместных научно-технических разработок, обобщающих законодательную и исходную нормативную базу по подходам к оценке безопасности и риска в проблемах чрезвычай-

$$R_i(t) = F\{P_i(t), U_i(t)\} \leq [R_i(t)]$$

$$R_i(t) \leq [R_i(t)] = F_n \{P_i(t), U_i(t)\} = \frac{1}{n_R} R_c(t) = \frac{1}{n_R} F_c \{P_c, U_c\} = F_z \{m_z Z(t)\}$$

$P_i(t) = F_p \{P_n(t), P_T(t), P_S(t)\}$ - Вероятности ЧС
 $U_i(t) = F_U \{U_n(t), U_T(t), U_S(t)\}$ - Ущербы от ЧС
 $R_i(t) = F_R \{R_n(t), R_T(t), R_S(t)\}$ - Риски ЧС

N - человеческий фактор
 T - техногенный фактор
 S - природный фактор

$R(t)$ - фактический расчетный риск
 $R_c(t)$ - критический (неприемлемый) риск
 $[R(t)]$ - приемлемый риск
 $Z(t)$ - затраты на снижение риска

Рисунок 6 — Определяющие соотношения для рисков $R(t)$

ных ситуаций, и набор этой информации сейчас нарастает. Предполагается продолжить эту работу в ближайшее десятилетие, так как проблема защищенности критически и стратегически важных объектов от тяжелых катастроф требует своего совместного решения на национальном и международном уровнях.

Надежность технических систем. На рисунке 7 показан типовой для зарубежной теории и практики подход к обеспечению надежности системы [9], который включает конструктивные (*Constructive*) и аналитические (*Analytical*) методы. В свою очередь, аналитические методы делятся на количественные (*quantitative*) и качественные (*qualitative*) методы. Среди количественных методов — расчет прогнозируемой надежности (*calculation of predictable reliability*), а к основным качественным методам относится анализ характера и последствий отказов (*FMEA — failure mode and effect analysis*). Важно отметить, что эти методы не подменяют друг друга, а взаимодействуют. *FMEA* позволяет выявить потенциальные отказы и принять меры для устранения или снижения вероятности их появления, минимизации ущерба, а количественные методы — рассчитать прогнозируемую надежность.

На рисунке 8 показаны ключевые методы для расчета показателей надежности системы R_{System} исходя из надежности элементов (слева) и типовые распределения отказов элементов (справа). Предполагается, что для расчета необходимы распределения отказов элементов, а надежность системы определяется на их основе. После этого надежность системы находится чисто математическим операциями над полученными распределениями. Подобный подход характерен для системной (структурной, математической) теории надежности, основной задачей которой является переход от показателей надежности элементов к показателям надежности системы.

Задачи расчета реальной надежности технической системы с учетом зависимостей ее элементов целесообразно решать на основе разрабатываемого подхода. Его принципиальная особенность состоит в том, что расчет надежности элементов и системы проводится в общем многоуровневом имитационном моделирующем процессе с применением физических и

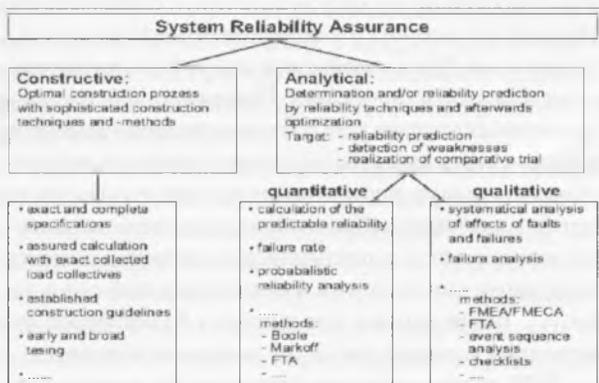


Рисунок 7 — Обеспечение надежности системы по [9]

$R_{System} = f(R_{Systemelement 1}, R_{Systemelement 2}, \dots)$	
system modeling / system theory	failure behaviour system element/ component distribution
<p>Boolean model:</p> $R_S(t) = \prod_{j=1}^n q_j(t) \prod_{j=1}^m (R_j(t))^{x_j} (1 - R_j)^{1-x_j}$	<p>Weibull distribution:</p> $R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$
<p>Markov process:</p> $\frac{dP_j(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} P_i(t) + \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} P_j(t)$	<p>Exponential distribution:</p> $R(t) = e^{-\lambda t}$
<p>Monte Carlo simulation:</p> $A(t) = \sum_{B \in \{1,2\}} \int_0^{\infty} \psi(B, \tau) \cdot R_S(B, t - \tau) \cdot d\tau$	<p>Gaussian distribution:</p> $R(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot d\tau$
<p>renewal theory:</p> $h(t) = f(t) + \int_0^{\infty} h(\tau) f(t - \tau) \cdot d\tau$	<p>Lognormal distribution:</p> $R(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\tau - t_0) - \mu}{\sigma} \right)^2} \cdot d\tau$

Рисунок 8 — Определение количественных показателей надежности по [9]

структурных моделей. Физические модели надежности элементов используются на низших уровнях, а структурные модели — на высших.

Сложные технические объекты, как правило, состоят из разнородных систем (подсистем). Теория надежности своим понятийным и расчетным аппаратом нацелена на выработку универсальных подходов к оценке надежности технических объектов. Вместе с тем имеются особенности в «надежностном» поведении элементов и систем различной физической природы, которые необходимо учитывать при развитии методологии и методов теории надежности.

Особенность 1. Теория надежности изначально 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. Один и тот же типовой механический компонент (например, подшипник) имеет различные условия работы в различных машинах и механизмах. Из-за этого его надежность существенно варьируется. Кроме того, несмотря на общую тенденцию в технике к использованию унифицированных компонентов механические объекты отличаются большим разнообразием в конструкции и технологии изготовления.

Особенность 2. Теория надежности сформировалась в результате рассмотрения проблемы: почему система, состоящая из многих надежных элементов, в целом является ненадежной? Основная формула теории, призванная дать ответ на данный вопрос, имеет вид

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

Она позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы (ВБР) системы $P(t)$ как произведение вероятностей безотказной работы P_i ее N элементов. Эта формула верна только в случае независимого поведения элементов. Ее применение дает некорректные результаты при применении к механическим системам.

Теоретически, любую механическую систему (или ее нерезервированную подсистему) при оценке надежности можно представить сколь угодно большим числом последовательно соединенных элементов. Надежность такой системы, рассчитанная по формуле (1), будет стремиться к нулю. Очевидно, что для реальных механических систем надежность может быть низкой, но не нулевой, и подобная ситуация не соответствует действительности. Это объясняется тем, что элементы реальной механической системы нельзя полагать независимыми. Их отказы/предельные состояния коррелированы, связаны друг с другом и определяются действием общих факторов. В этом состоит принцип ресурсно-зависимого поведения элементов в нагруженной механической системе.

Следует отметить, что зависимое поведение имеет место и в немеханических системах: электрических, электронных и т. д. Однако во многих случаях, анализируя немеханические системы, указанным эффектом можно пренебречь.

Технические объекты в значительной степени состоят из механических компонентов, поэтому в расчетах, основанных на аппарате теории надежности, необходимо учитывать зависимое, организованное поведение, по крайней мере, элементов механической системы объекта. Учет указанных эффектов во многом определяет методическое совершенство расчета технического объекта на надежность.

В работе [10] приведен и классифицирован ряд характерных зависимостей элементов механических систем. Среди них следует выделить зависимость *нагруженности (и, как следствие, ресурса) элементов от общего уровня нагруженности конкретной механической системы, который определяется, в конечном счете, условиями ее эксплуатации*. Эта зависимость является глобальной, присущей всем системам, различается степенью проявления: от сильной (квазидетерминированной) до слабой вероятностной связи. При этом нагруженность следует трактовать в широком смысле как любой фактор, воздействующий на систему. Смысл указанной зависимости состоит в том, что чем выше нагруженность, тем ниже надежность (ресурс) элементов, подверженных действию данного фактора.

Особенность 3. Для мобильных технических объектов характерна существенная вариация условий эксплуатации из-за того, что каждый объект имеет уникальное поведение во времени и пространстве, а также в условиях разнообразных действий операторов. Поэтому при расчете надежности необходимо воспроизводить вероятностный спектр условий эксплуатации объекта. Кроме того свойства компонентов также имеют вероятностную природу в силу разброса свойств материалов и производственных технологий.

Общая многоуровневая процедура расчета надежности. Подходы к расчету надежности машины машин целесообразно оценивать по степени ото-

бражения в них рабочих процессов машины, ее агрегатов и систем. Полное отображение в моделях рабочих процессов может быть обеспечено за счет имитационного моделирования множества рассматриваемых объектов за весь их срок службы. Однако такой подход обычно нереален, и для практического использования в рамках направления «Ресурсная механика машин» (РММ) разработана процедура, рационально сочетающая имитационные фрагменты и использование обобщенных параметров и переменных для отдельных фрагментов процедуры моделирования (рисунок 9) [11, 12].

Общая процедура воспроизводит отмеченную выше вероятностную природу условий эксплуатации, свойств компонентов и эффекты зависимого поведения их в системе. Для этого используется многоуровневое представление машины (см. рисунок 9) и моделирование методом Монте-Карло, в который встроены локальные процедуры, обеспечивающие зависимое поведение элементов.

Низшие физические уровни (6, 5 и в ряде случаев 4) содержат описания несущей способности элементов и их *ресурсно-прочностных кривых*, что позволяет реализовывать в расчетах зависимость по общим условиям эксплуатации и другие зависимости элементов.

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 физических уровней) либо характеристик отказов элементов (при воспроизведении поведения отдельных компонентов со структурных уровней).

Условия эксплуатации описываются вероятностным способом в форме вариации (распределений относительных продолжительностей) типовых условий, которые принимаются как характерные для рассматриваемого типа машин (например, движение в городе, на автостраде, на шоссе в холмистой местности и т. д.).

Ресурсно-прочностные кривые (РПК) представляют собой набор (по числу условий эксплуатации) зависимостей ресурсов компонента от параметра его несущей способности в определенных условиях эксплуатации. 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 (см. рисунок 9) получают детерминированным расчетом методами механики.

РПК выполняют две функции. Во-первых, определение ресурса в главной процедуре происходит

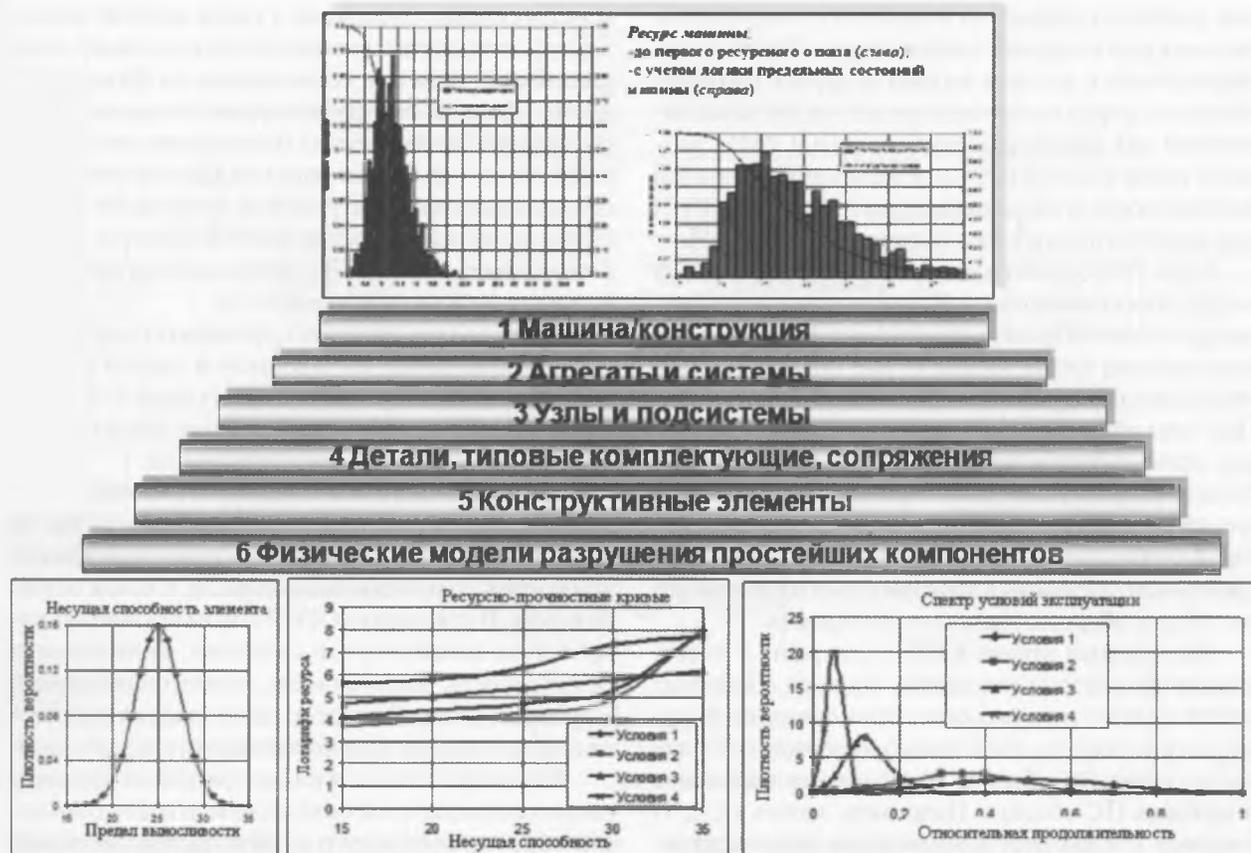


Рисунок 9 — Расчет надежности машины/конструкции как многоуровневого объекта: физические (6–5) и структурные (4–1) уровни

путем обращения к РПК без проведения подробного расчета ресурса компонента. При этом могут быть получены ресурсы для любых промежуточных значений параметра несущей способности. Во-вторых, использование РПК обеспечивают согласованное определение ресурсов (или наработок до отказа) для всех условий эксплуатации в зависимости от выбранного в процессе моделирования случайного значения параметра несущей способности. Тем самым воспроизводится глобальная зависимость ресурсов (наработок) 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 РПК находятся наработки до отказа (или предельного состояния) компонентов, а затем с учетом относительных продолжительностей условий — наработка системы в целом. Таким образом, наработки компонентов и системы формируются параллельно, в рамках одной вычислительной процедуры. Тем самым воспроизводится 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 воспроизводятся потоки отказов и формируются данные для построения распределений наработок всех компонентов и системы (машины) по всем условиям эксплуатации.

Учет сложной логики отказов (предельных состояний) технического объекта. В расчетах до первого отказа наработка (ресурс) системы определяется по минимальному значению наработки (ресурса) элемента (по слабому звену). Понятие отказа (наработки до предельного состояния) может основываться на сложных логических схемах, отличных от схемы расчета 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) [13]. Ресурс агрегата определяется достижением предельного состояния нескольких его составных частей (деталей).

Для описания сложной логики отказов в 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 примене-

ния 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 вводятся *схема отказов* (СО) для расчетов показателей безотказности и *схема предельных состояний* (СПС) для расчетов показателей долговечности [14, 15].

СО (СПС) состоит из иерархической структурной схемы, объектами которой являются компоненты машины, и записей предельных состояний для объектов всех уровней кроме низшего. Все объекты, кроме объекта высшего уровня (машины) наделяются типом. При этом объекты, отказы которых имеют одинаковую значимость для объекта более высокого уровня, относят к одному типу. Для объектов (кроме объектов низшего уровня) формируется схемная запись, в которой отображается условие отказа или достижение предельного состояния в зависимости от состояния его частей, т. е. объектов нижестоящего уровня.

Так схемная запись в СПС содержит k чисел, каждое из которых указывает, сколько составных частей данного типа (в соответствии с позицией числа) должно достичь предельного состояния (ПС) для наступления ПС объекта. Комбинация этих чисел описывает ПС объекта. Например, запись (1, 2, 1) означает, что для наступления предельного состояния объекта должны предельных состояний достичь: одна составная часть первого типа, две составные части второго типа и одна третьего.

Таким образом, обычная иерархическая схема объекта дополняется простыми схемными записями для каждого объекта, кроме объектов нижнего уровня, и на этом задача схематизации для расчета сложной логики предельных состояний завершается.

Информация о предельных состояниях объекта включает: данные, формируемые по иерархической схеме составных частей; данные о свойствах объектов в схеме, например, данные о ресурсах объектов нижестоящего уровня. Объект может иметь несколько схем предельных состояний. По каждой из них определяется ресурс. В качестве расчетного ресурса принимается наименьший. Низшие физические уровни содержат описание несущей способности элементов и их РПК, что позволяет реализовывать в расчетах зависимость по общим условиям эксплуатации и другие зависимости элементов.

Расчет ресурса по схеме предельных состояний является завершающей процедурой-надстройкой в одном цикле расчета ресурса машины.

Полная процедура расчетов. В полном объеме процедура расчета показателей безотказности и долговечности может быть представлена следующим образом. Основной инструмент расчета — метод статистических испытаний. На каждом шаге статистического моделирования воспроизводятся: условия эксплуатации, представленные вероятностной моделью и несущая способность элементов. Посредством РПК определяются наработки и отказы (предельные состояния)

конструктивных элементов, а также деталей, сопряжений и стандартных компонентов (например, подшипников), если они описываются на физическом уровне. Далее на структурных уровнях определяются по сложной логике отказы (предельные состояния) узлов и т. д. — до уровня машины в соответствии с ее многоуровневой структурой (см. рисунок 9). Принципиальной особенностью расчета является то, что он соединяет в единой процедуре модели механики и структурной теории надежности.

Такой подход позволяет проводить расчеты надежности машины, ее агрегатов и систем при их различных представлениях (начиная с любого структурного уровня) и всех стадиях проектирования, включая ранние, концептуальные.

Расчеты показателей надежности (безотказности) и долговечности (ресурса). В западных стандартах по надежности понятие «Reliability» трактуется как надежность в количественном смысле, т. е. как безотказность. В стандартах СССР под надежностью понималось комплексное свойство, включающее безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Каждое из свойств характеризуется определенными количественными показателями.

Ниже представлены иллюстративные примеры расчетов показателей безотказности и долговечности объекта, состоящего из двух частей: автотранспортного средства (АТС) и кузова-контейнера с техническими подсистемами [16].

При оценке наработки на отказ учитываются отказы шасси, прицепа и элементов подсистем кузова контейнера.

Поток отказов изделия формируется из отказов подсистем и элементов более низкого уровня. Например, если в автотранспортную подсистему (АТС) входит один автомобиль с прицепом и отказ каждого из этих двух элементов приводит к отказу изделия в целом, то в потоке отказов изделия должны быть представлены отказы двух упомянутых элементов.

На рисунке 10 показана схема отказов (СО) исследуемого объекта.

При оценке срока службы учитываются предельные состояния: 1) автотранспортной части; 2) части кузова-контейнера с подсистемами.

Для первой части предельное состояние — исчерпание ресурса шасси или прицепа (одного из них); для второй части предельное состояние — исчерпание ресурса кузова-контейнера и трех его подсистем: фильтро-вентиляционной, энергетической и кабельной, — всех объектов. Предельное состояние изделия — исчерпание ресурса одной из частей.

Общая схема предельных состояний (СПС) объекта представлена на рисунке 11. СПС трактуется аналогично схеме отказов в части перехода от ПС элементов к ПС подсистем и далее к ПС изделия. Отличием от моделирования потока отказов является расчет показателей изделия по его СПС, который завершается определением среднего значения срока службы и других показателей изделия аналогично

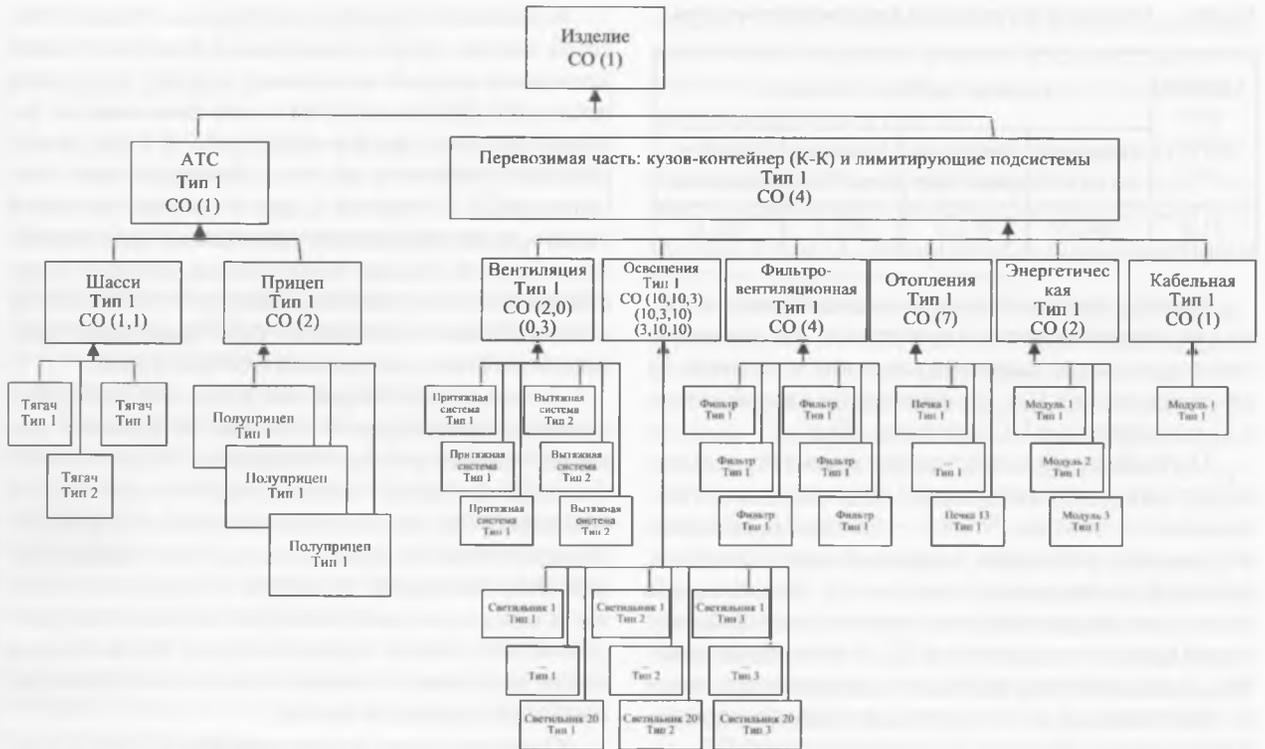


Рисунок 10 — Схема отказов изделия

расчетам показателей подсистем на промежуточном уровне. В СПС представлены элементы, которые определяют срок службы объекта, исключены быстро заменяемые узлы, которые не относятся к определяющим ресурс основным составным частям.

Расчеты выполнены с использованием программного обеспечения [17]. Результаты расчетов представлены в таблице. Поскольку при расчете показателей безотказности результаты зависят от начальной точки по времени выборки, то расчеты выполнены для трех начальных точек отсчета и усреднены.

Особенности ресурсных расчетов механических систем. 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 осно-

ве различных материалов и технологий, подвергаются различным видам нагружения и разрушительным процессам, это неосуществимо. Основные причины — разнообразие и неопределенность условий и режимов эксплуатации, неустраняемый разброс характеристик несущей способности компонентов. К тому же, проектировать все составные части машины на один и тот же ресурс нецелесообразно по экономическим соображениям.

Классификация ресурсных расчетов машины как механической системы. Ресурсные расчеты предлагается разделить на два типа: расчеты ресурса и оценка расхода ресурса.

Расчеты ресурса основаны на трактовке ресурса как наработки до предельного состояния, после которой эксплуатация (использование) рассматриваемого механического объекта недопустима или нецелесообразна.

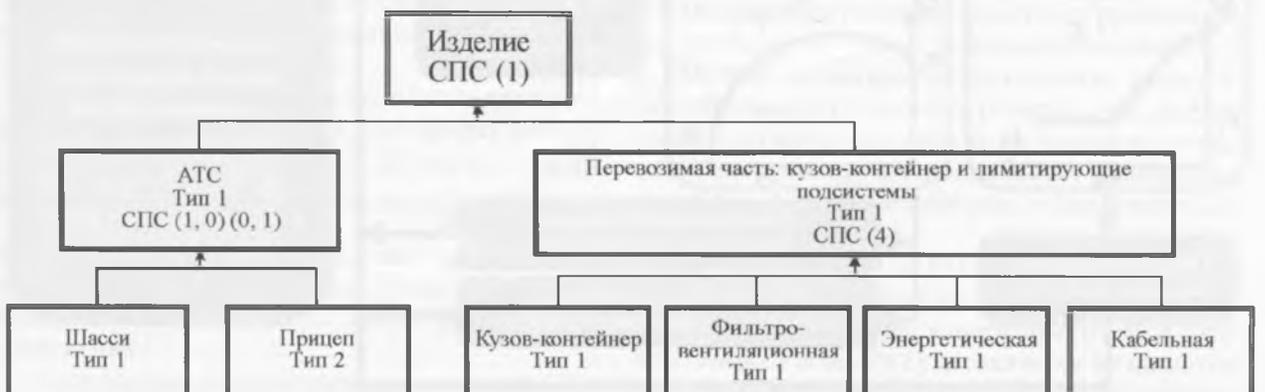


Рисунок 11 — Схема предельных состояний изделия

Таблица — Показатели безотказности и долговечности изделия

Средний срок службы, лет	Средняя наработка на отказ, ч			
	Начальная точка 0 ч	Начальная точка 3650 ч	Начальная точка 7300 ч	Среднее по трем точкам
21,0	1042,9	912,5	912,5	956,0

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 (рисунок 12).

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.

В инженерной практике оценка работоспособности деталей машин основывается на расчетах долговечности и прочности их конструктивных элементов с использованием, главным образом, критериев первого типа, поскольку для многих деталей преобладает определенный вид нагружения, соответствующее ему повреждающее действие нагрузок и простое одномерное предельное состояние.

К наиболее методически трудным случаям относятся оценки работоспособности конструктивных элементов деталей мобильных машин, поскольку последние функционируют в широком спектре условий эксплуатации и режимах работы и при разнообразных действиях водителя. Выход из строя конструктивных элементов и, как следствие, деталей и узлов машин обусловлен процессами накопления повреждений, а также перегрузками, которые сопоставляются с несущей способностью, определяемой конструктивно-технологическими факторами процессов изготовления деталей и сборки узлов.

Расход ресурса. Второй тип ресурсных расчетов — оценка расхода ресурса — основан на трактовке понятия «расхода ресурса» как расхода ресурсного потенциала составных частей механического объекта (машины). Это понятие распространяется и на ситуацию, когда машина в целом достигает своего предельного состояния. При этом каждую составную часть можно оценить с позиции ее «донорских способностей», а затем провести оценку для машины в целом, как объекта, имеющего несколько основных (главных) составных частей.

Основные схемы расчета ресурса. Случай 1 с одномерным процессом повреждения методически не представляет проблемы.

Принципиальная схема расчета компонентов машин, в которой отражены два главных вида повреждающих процессов, связанных с накоплением повреждений и перегрузками, представлена на рисунке 13. Здесь R — мера несущей способности (цикlostойкость); q — единичная мера повреждения по



Рисунок 12 — Классификация ресурсных расчетов

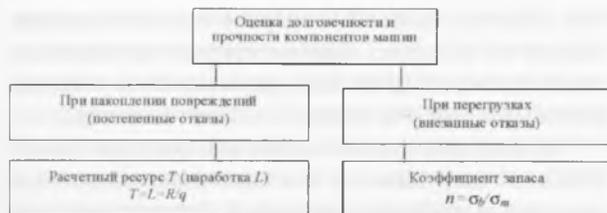


Рисунок 13 — Схема расчета компонентов технических систем

накоплению повреждений (единичная циклонапряженность или циклонапряженность, приходящаяся на единицу наработки); σ_b и σ_m — разрушающая и действующая нагрузки соответственно.

При детерминированных оценках для характеристик несущей способности R и σ_b целесообразно принимать значения, соответствующие 90%-ной вероятности неразрушения, а для характеристик повреждения q и σ_m — значения, полученные в условиях, равных или превосходящих средний уровень по степени тяжести нагружения.

При расчете q необходим спектр нагрузок, а σ_m определяется в результате динамического расчета, который описывает неблагоприятные, но реальные условия нагружения.

Для распространенных моделей накопления усталостных повреждений расчет ресурса T (наработки L в километрах, часах, циклах и т. д.) можно представить в ресурсной форме

$$T = L = R / q, \quad (2)$$

где используется мера несущей способности R в виде циклостойкости, а мера повреждения q — в виде единичной циклонапряженности, причем R и q могут быть рассчитаны отдельно, но с учетом их связей (например, по пределу выносливости).

При расчете ресурса прямым моделированием процесса движения повреждающее действие q рассчитывается в процессе моделирования для каждого элемента, и нет необходимости сохранять спектр нагрузок. В расчетах, основанных на предварительном получении спектра нагрузок, последний, как правило, определяется на входном валу (или пересчитывается к входному валу) узла, затем по этому спектру находятся спектры нагрузок отдельных элементов с учетом конструктивно-кинематических и геометрических параметров узла и элементов, а также скоростных параметров, определяющих динамические составляющие нагруженности.

В общем случае спектр нагрузок на входе в узел машины можно представить в виде кривых распределения моментов $f_{Mk}(M)$, $k = \overline{1, K}$, где K — число условий (режимов) с вероятностями α_k , и $\sum_{k=1} \alpha_k = 1$.

Для каждого из этих условий может быть рассчитан частный ресурс L_k , а кроме того, может быть определен общий ресурс L с учетом всех режимов нагружения.

Если частные ресурсы определяются в виде (2), а общий ресурс в явном виде включает частные ре-

сурсы, то такие соотношения будем называть *множественной ресурсной формой*. Распространенные модели многоциклового усталости в ресурсной форме представлены в [10, 18].

Ресурсная форма представления моделей процессов повреждения в процессе наработки является необходимым условием реализации предложенной процедуры расчета надежности с использованием ресурсно-прочностных кривых.

Аппроксиматоры ресурса. Для определения ресурса деталей в различных условиях эксплуатации предлагается использовать представленные в полупологарифмическом виде кривые, приведенные на рисунке 14, которые названы аппроксиматорами ресурса [19]. Они служат для определения ресурсов в спектре общих условий эксплуатации следующим образом.

Для каждого типовых условий по ресурсам L_m и вероятностям β_m , соответствующим выделенным диапазонам значений рассматриваемых подъемов, определяются ресурсы L_p , а по ним с учетом долей пробега ξ_i в типовых условиях рассчитывается ресурс для общих условий эксплуатации L :

$$L_i = \frac{1}{\sum_{m=1}^K \frac{\beta_m}{L_m}}, \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{\sum_{i=1}^J \frac{\xi_i}{L_i}}, \quad (4)$$

где K — число выделенных интервалов в распределении подъемов в i -х типовых условиях, J — число типовых условий эксплуатации (из базового спектра общих условий).

Использование аппроксиматоров дает новый расчетный инструмент, который позволяет заинтересованному специалисту самому конструировать пространство эксплуатационных условий и определять для него ресурсы исследуемых элементов.

Случай 2 рассматривается ниже на примере двух характерных ситуаций.

Первая ситуация — действие процессов накопления повреждений и перегрузок.

На практике расчет на перегрузку проводится, как правило, вне связи с наработкой машины.

Однако возможно использование моделей, включающих этот расчет в общую схему расчета ресурса с учетом постепенных и внезапных отказов. Если принять, что постепенные и внезапные отказы компонента независимы, то вероятность его безотказной работы

$$P(L) = P_1(L)P_2(L), \quad (5)$$

где $P_1(L)$, $P_2(L)$ — вероятности безотказной работы в условиях постепенных и внезапных отказов соответственно. Расчет $P_1(L)$ методически не представляет проблемы. Особенности расчета ВБР при внезапных отказах в зависимости от наработки имеет

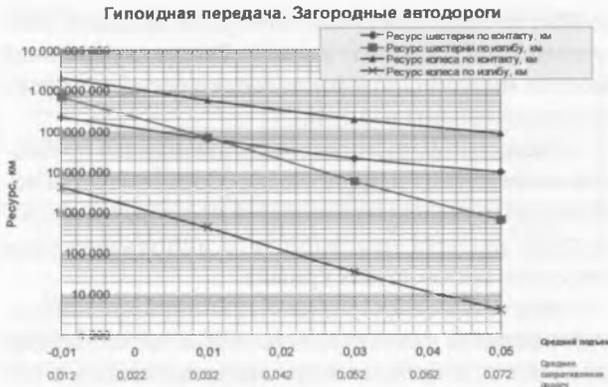


Рисунок 14 — Аппроксиматор ресурса для гипоидной передачи автопоезда в условиях загородных автомобильных дорог

свои особенности, поскольку этот вид отказов может проявиться в любой момент работы объекта вне зависимости от величины его наработки. Применительно к автотракторной технике методика расчета указанной вероятности приведена в [20]. Расчет основывается на частоте появления максимальных динамических нагрузок в реальных условиях и вероятности того, что эта нагрузка приведет к отказу (поломке) компонента. В такой схеме расчета может быть реализован также учет снижения прочностных свойств компонента в процессе наработки, и наоборот, снижение несущей способности элемента в результате действия высоких динамических нагрузок. Тогда рассматриваемые процессы становятся зависимыми. В таком случае расчет на каждое из рассматриваемых предельных состояний («на долговечность» и «на прочность») включает учет двух повреждающих процесса.

Вторая ситуация — расчет ресурса по многоциклового усталости при постоянном действии двух видов нагрузок, например, циклического напряжения σ_k и поверхностного давления p .

Действие нагрузок для рассматриваемого случая может быть *согласованным*, т. е. увеличение входной нагрузки узла ведет к росту и циклического напряжения, и поверхностного давления его элемента.

Методика расчета подобного объекта иллюстрируется рисунками 15—17 [19].

Диаграмма предельных состояний как характеристика несущей способности представляет собой зависимость предела выносливости σ_r от действующего давления на поверхности элемента p (рисунок 15).

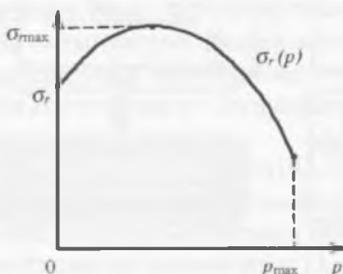


Рисунок 15 — Диаграмма предельных состояний

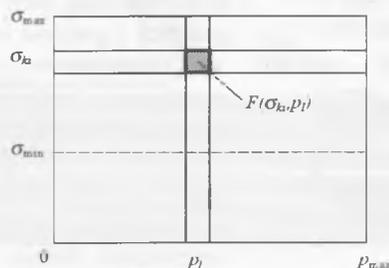


Рисунок 16 — Таблица нагрузочных состояний

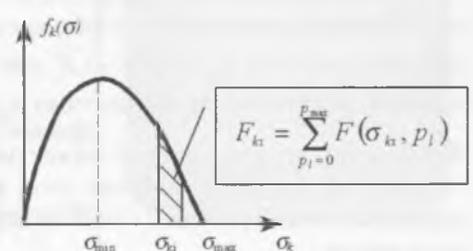


Рисунок 17 — Расчет вероятности нагрузочного состояния

Она является базовой экспериментальной информацией об элементе. При отсутствии экспериментальных данных могут быть использованы типовые диаграммы (работы проф. Л.А. Сосновского).

Таблица нагрузочных состояний (рисунок 16) дает сочетания нагружающих факторов (напряжений σ_k и давлений p) в определенных (k -х) эксплуатационных условиях и устанавливает их вероятности $F(\sigma_{ki}, p_i)$. Подобные таблицы формируются для всех рассматриваемых K условий эксплуатации объекта в результате моделирования системы либо по данным эксперимента. Схема расчета элементарной вероятности для определенного давления показана на рисунке 17.

Ресурс элемента рассчитывается с применением диаграммы предельных состояний и таблиц нагрузочных состояний. Мера повреждения за единицу наработки в k -х условиях

$$q_k = N_{1,Sk} \sum_{\sigma_{ki}=\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \sigma_{ki}^m \sum_{p_i=0}^{p_{max}} \frac{F(\sigma_{ki}, p_i)}{[\sigma_r(p_i)/\sigma_r(0)]^m} = N_{1,Sk} \sum_{\sigma_{ki}=\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \sigma_{ki}^m F_{ki} K_{TFki}^m, \quad (6)$$

где $N_{1,Sk}$ — число циклов нагружения за единицу наработки; $F(\sigma_{ki}, p_i)$ — вероятность нагрузочного состояния, т. е. действия напряжения σ_{ki} и давления p_i ; F_{ki} — вероятность действия напряжения σ_{ki} ; $\sigma_r(p_i)$ — предел выносливости как функция давления p_i .

Последняя формула содержит нагрузочный коэффициент

$$K_{TFki} = \left\{ \sum_{p_i=0}^{p_{max}} \frac{F(\sigma_{ki}, p_i)/F_{ki}}{[\sigma_r(p_i)/\sigma_r(0)]^m} \right\}^{1/m}, \quad (7)$$

которым она отличается от обычной формулы для расчета меры повреждения при многоциклового усталости, представленной в ресурсной форме.

Использование нагрузочного коэффициента K_{TF} позволяет сохранить преимущество с обычным (одномерным) расчетом на многоциклового усталость. Анализ его значений для типовых диаграмм и спектров нагружения дает возможность оценить ресурсное действие фактора давления на многоциклового усталость.

Следует отметить, что нагрузочный коэффициент в определенной степени имеет аналог в лице корректирующего коэффициента a_p , введенного В.П. Когае-

вым в расчеты по многоцикловой усталости [22], и его последующих модификаций [23, 24]. Он также определяется составом нагрузок и значением предела выносливости элемента. Представляет интерес количественное сравнение a_p и K_{TF} при наличии достоверных экспериментальных данных по нагруженности, ресурсу и пределам выносливости элементов.

Для объектов со сложным комплексом нагружения принципиальный интерес представляют вопросы последствий и истории нагружения. Например, после работы в условиях объемного напряжения и контактного давления, снимается давление. Что произойдет при этом с пределом выносливости: останется прежним, изменится? Эта проблема имеет отношение к переменным режимам работы мобильных машин.

При построении расчетов любых объектов со сложным комплексом нагружения (не только для рассмотренного выше сочетания усталость — износ) следует переходить к простым по структуре соотношениям (ресурсной форме)

$$L_{TF} = L_F K_{TF}. \quad (8)$$

При этом целесообразно использовать предложенные коэффициенты K_{TF} , которые уточняют ресурсы L_F , получаемые по простым одномерным расчетам.

Случай 3 — многомерный расчет ресурса системы со сложным комплексом предельных состояний. 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 исчерпания ресурса привлекаются разнообразные критерии: технические, экономические, физические и другие.

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 (и 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). При этом наиболее естественным является подход, когда предельное состояние машины описывается на основе технических критериев, т. е. через предельные состояния агрегатов, последних — через предельные состояния узлов, а их в свою очередь — через детали. ПС детали с ресурсной точки зрения должна быть описана через ПС ее конструктивных элементов, каждый из которых наделен определенной несущей

способностью. 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.

Расчет ресурса системы со сложным комплексом предельных состояний проводится по рассмотренной выше процедуре статистических испытаний, воспроизводящей в каждом цикле моделирования сложную логику предельных состояний объекта.

Оценка расхода ресурса. Несмотря на развитость терминологического аппарата теории надежности, понятие расхода ресурса технической системы (машины) в ней отсутствует. На практике возможна ситуация, когда одна или несколько составных частей машины (например, автомобиля) являются слабыми звеньями и достижение ими предельных состояний приводит, по крайней мере — формально (на основании критериев их предельных состояний), к исчерпанию ресурса машины. Вместе с тем, в автомобиле могут быть узлы, которые обладают определенным остаточным ресурсом, хотя по признакам предельного состояния автомобиль в целом ресурс исчерпал. Возможно, что на автомобиле имеются недавно замененные узлы, состояние которых не учитывается при определении предельного состояния автомобиля в целом. Как в этом случае трактовать расход ресурса автомобиля в целом?

Для восполнения указанного понятийного пробела и разработки метода для оценки расхода ресурса автомобиля и других мобильных машин введено понятие расхода ресурса автомобиля [25]. Под расходом ресурса K_{AT} автомобиля понимается средневзвешенный расход ресурса его основных частей

$$K_{AT} = \sum_{i=1}^N \xi_i K_{pi}, \quad (9)$$

где K_{pi} — расход ресурса i -й основной части автомобиля; ξ_i — удельный показатель, имеющий смысл доли или вклада расхода ресурса i -й основной части в совокупном расходе ресурса автомобиля.

В качестве ξ_i предлагается использовать относительную массу, т. е. массовую долю основной части в общей сумме масс основных частей автомобиля.

Расход ресурса K_p основной части автомобиля определяется как функция ее наработки и возраста. Определение K_p основано на предлагаемой следующей зависимости

$$K_p = 1 - (1 - K_L)(1 - K_T), \quad (10)$$

где K_L — расход ресурса в относительных единицах по пробегу; K_T — расход ресурса в относительных единицах по возрасту.

Необходимо также отметить, что формула для расчета K_p может быть интерпретирована как вероятность безотказной работы объекта P , которая определяется действием двух независимых факторов

$$P = 1 - F_1 F_2, \quad (11)$$

где $F_1 = 1 - P_L$ — вероятность отказа объекта по наработке, $F_2 = 1 - P_T$ — вероятность отказа объекта по времени (возрасту).

Представленная общая зависимость для определения расхода ресурса основных частей по их пробегу в составе автомобиля и возрасту имеет нелинейный характер даже при линейных зависимостях K_L и K_T . Кроме того, она универсальна и как частные случаи включает известные зависимости, используемые для оценки расхода ресурса (физического износа) машин.

В работе [26] показаны особенности подхода к оценке расхода ресурса составных частей: применение различных по виду и параметрам законов, описывающих действие нагружающих факторов и возраста. При этом для основных частей технических средств выделены типовые группы, имеющие сходный характер расхода ресурса по пробегу (условия, характер нагружения, процессы повреждения) и возрасту, причем фактор возраста является постоянно действующим, но имеет различную степень интенсивности. Продемонстрированы пути получения моделей для расхода ресурса составных частей: сравнительный анализ и использование содержательных зависимостей, описывающих действие повреждающих факторов.

Диагностика — ключевой компонент сокращения непроизводительных расходов и повышения безаварийной работы машин. Одним из путей сокращения непроизводительных расходов при эксплуатации изделий машиностроения является переход от планово-предупредительной системы обслуживания оборудования и машин к обслуживанию по их фактическому состоянию. Основная идея планово-предупредительных ремонтов о том, что остаточный ресурс механизма определяется только временем его эксплуатации, не находит подтверждения на практике (не менее 50 % из числа всех работ по техническому обслуживанию, выполняемых в соответствии с регламентом, проводятся без фактической их необходимости), носит явно выраженный затратный характер [27].

Обслуживание по фактическому состоянию базируется на получении объективной и достоверной информации о техническом состоянии механической системы во время ее эксплуатации без остановки и разборки. Суть технологии состоит в том, что обслуживание и ремонт производятся в зависимости от реального текущего технического состояния механизма, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-либо разборок и ревизий, на базе контроля и анализа соответствующих параметров. При этом определяются реальные причины происходящих изменений в каждой конкретной ситуации, принимаются обоснованные решения по их устранению.

Особую актуальность вопросы обслуживания по фактическому состоянию имеют для трансмиссионных узлов мобильной техники. Элементы трансмиссии работают в условиях высоких скоростей и нагрузок и их состояние в значительной степени определяет

техническое состояние машины в целом. Время безотказной работы элементов трансмиссии является величиной случайной, так как наработка на отказ каждой сборочной единицы различна и колеблется в широких пределах. Поэтому, как правило, выявляется наиболее «слабое» звено или элементы определяющие показатели надежности и ресурса узла в целом, и методами безразборной диагностики отслеживается их техническое состояние в процессе эксплуатации. В ряде случаев, такими слабыми элементами в трансмиссионных узлах мобильных машин являются зубчатые передачи. В частности, мониторинг местных повреждений зуба зубчатого колеса (износ, питтинг, сколы, трещины и т. д.) наиболее важен, т. к. большой процент (до 60 %) повреждений трансмиссионных механизмов происходит вследствие выхода из строя зубчатого колеса, который, в свою очередь, инициируется местным повреждением зуба. Все это в полной мере относится и к планетарно-рядным зубчатым передачам редукторов моторколес (РМК) большегрузных карьерных самосвалов БелАЗ, часто лимитирующим ресурсы работоспособности этих уникальных машин. С увеличением срока эксплуатации машин возрастают объемы работ по их ремонту и техническому обслуживанию. Необходимо постоянно контролировать техническое состояние сборочных единиц машины и с помощью комплекса мероприятий технического обслуживания поддерживать их в работоспособном состоянии. Существенную роль в этом играет диагностика, позволяющее при одновременном сохранении надежности существенно сократить время нахождения машин в техническом обслуживании и ремонте.

Из существующих методов оценки технического состояния трансмиссионных узлов в эксплуатации (прогнозирование ресурса по величине массы частиц износа в масле, потере КПД, изменению рабочей температуры наиболее нагруженных элементов и др.) наиболее перспективными являются методы безразборного контроля динамических характеристик приводных механизмов путем постоянного или периодического мониторинга их вибрационных параметров. Интенсивность и частотный состав вибрационных колебаний содержат объективную информацию о многих качественных и количественных характеристиках контролируемых объектов и широко используются при комплексном контроле качества изготовления, сборки, разбраковке различных технических систем и технологического оборудования.

В СНГ и странах дальнего зарубежья проводятся интенсивные работы по созданию методических и программно-инструментальных средств оценки технического состояния и остаточного ресурса ответственных узлов различного оборудования. Исследования в этом направлении ведутся в крупнейших отечественных научных центрах и ведущих зарубежных фирмах (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Мос-

ковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Центр промышленных роботов Франции, фирмы «Rockwell Standart» (США), «Brul & Kjaer» (Дания), «SKF» (Швеция) и др.) [28, 29].

Особенностью диагностики трансмиссионных узлов в условиях эксплуатации машин, во многих случаях является невозможность использования стандартных виброакустических средств контроля. Это связано с тем, что подавляющее большинство разработанных диагностических методов и стандартных инструментальных средств ориентированы на диагностику подшипниковых узлов и наиболее эффективны при диагностировании роторных узлов машин работающих в квазистационарных условиях. В таких условиях рабочие скорости и нагрузки меняются незначительно, а динамика механизма обусловлена в основном геометрическими погрешностями изготовления и монтажа деталей и их изменениями в процессе эксплуатации. Это различные редукторы технологического оборудования, испытательные и обкаточные стенды, вентиляторы, турбины, компрессоры, насосы, редукторы авиационной техники и др. Вибрационные характеристики таких машин, при нормальном функционировании имеют достаточно стабильный характер, что значительно упрощает разработку алгоритмов съема и анализа диагностической информации.

Трансмиссионные системы автотракторной техники работают, как правило, в условиях практически постоянно меняющихся скоростей и нагрузок. Большое влияние на вибрационные характеристики узлов трансмиссии, помимо внутренних факторов, оказывают внешние динамические воздействия, обусловленные рельефом местности и покрытием дороги, степенью загрузки автомобиля, квалификацией водителя и т. д. В таких условиях характер вибраций (амплитудный и частотный состав) постоянно меняется, использование серийно выпускаемой аппаратуры для вибромониторинга технического состояния элементов трансмиссии путем спектрального анализа в процессе эксплуатации автомобиля оказывается весьма затруднительным. Поэтому для диагностики трансмиссионных систем эксплуатируемой автотракторной техники необходимы специальные методы и средства.

В настоящее время разработана методология и инструментальные средства оценки технического состояния и вибромониторинга трансмиссионных узлов мобильной техники, позволяющие прогнозировать их остаточный ресурс в процессе эксплуатации. Существенным отличием предложенных подходов от известных является возможность оценки технического состояния сложных мобильных механических систем в условиях их работы при переменных нагрузках и скоростях. Разработанные методические подходы базируются на результатах теоретических исследований, связанных с решением задач ударного пересопряжения зубчатых профилей применительно к задачам вибродиагностики, анализе расчетно-эк-

спериментальных диагностических моделей механизма, связывающих уровень предельных вибраций узла со степенью и накоплением повреждений его элементов в эксплуатации [30—32].

Износ и контактное выкрашивание изменяют шаг зацепления зубчатой передачи и величины контактных площадок, усталостные трещины — жесткость зацепления. Это приводит к изменению величин динамических составляющих нагрузки в зубчатом зацеплении. В свою очередь величина динамической нагрузки определяет уровень виброакустической активности зубчатой передачи, что дает возможность установить взаимосвязь динамической составляющей нагрузки с параметрами вибраций, и, далее, со степенью износа и контактного выкрашивания отдельных пар зубьев, а также появлением усталостных трещин у ножек зубьев.

Таким образом, используя корреляционную связь между параметрами износа (контактного выкрашивания) и изменением параметров вибраций в процессе эксплуатации, можно оценивать текущее техническое состояние и остаточный ресурс зубчатых механизмов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы при создании методических и программно-инструментальных средств вибромониторинга редукторов мотор-колес большегрузных самосвалов БелАЗ в процессе их карьерной эксплуатации. Разработка аппаратной части системы вибромониторинга редукторов мотор-колес основывалась на методике и алгоритмах, охватывающих ключевые моменты технологии диагностирования редукторных систем данного типа и непосредственно обеспечивающих сбор, обработку и выдачу информации о степени опасности диагностируемых состояний [33, 34]. Структура системы вибромониторинга представлена на рисунке 18.

Созданные методология, инструментальные и программные средства безразборной оценки технического состояния трансмиссионных узлов машин предназначены для своевременного предупреждения в условиях эксплуатации машины о предаварийном состоянии зубчатых приводных механизмов для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом автомобиля из строя. Применение бортовой системы вибромониторинга обеспечит повышение сроков службы и эксплуатационной готовности техники, переход от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по фактическому состоянию, снижение времени простоя автомобильной техники, сокращение затрат на их обслуживание и ремонт.

Заключение. Снижение техногенных рисков, обеспечение надежности сложных технических объектов требует консолидированных усилий специалистов, разработки нормативной и расчетной базы, развития методов прогнозирования отказов и их последствий в условиях постоянного усложнения технических систем, роста их энерговооруженности. Представленные



Рисунок 18 — Структура системы вибромониторинга РМК «БелАЗ»

результаты обобщают имеющуюся информационно-методическую базу в областях надежности и безопасности сложных технических объектов и являются основой для ее дальнейшего развития.

Результаты получены в рамках работ, выполняемых специалистами Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, в том числе работ по проекту № 12-08-90026-Бел_а (РФ)/Т12Р-004(РБ) «Фундаментальные исследования динамических процессов эксплуатационных воздействий, накопления повреждений и разрушений в объектах машиностроения, прогнозирование ресурса на стадии проектирования и оценка их надежности», поддержанного российским и белорусским фондами фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности: в 4 ч. / под ред. К.В. Фролова. — М.: Знание, 2006—2008.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и управление безопасностью: методич. Рекомендации / рук. авт. кол-ва Н.А. Махутов, К.Б. Пуликовский, С.К. Шойгу. — М.: Знание, 2008. — 672 с.
3. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
4. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. / Р.А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2005. — Т. 1: Критерии прочности и ресурса. — 494 с. — Т. 2: Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
5. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Сер. монографических публикаций из 9 книг / под ред. Н.А. Махутова. — М.: Наука, 1987—2009.
6. Прочность при малоцикловом нагружении. Сер. монографических изданий из 7 книг / под ред. С.В. Серенсена, Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. — М.: Наука, 1968—2006.
7. Развитие международного сотрудничества по программам анализа риска и чрезвычайных ситуаций в государствах-участниках СНГ / Н.А. Махутов // Сб. докл. IV Междунар. науч.-практич. конф. «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», 6—8 июня 2007 г., г. Минск; редкол. Э.Р. Бариев [и др.]. — Минск: НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, 2007. — С. 36—56.
8. Махутов, Н.А. Анализ опасностей, вызовов, угроз и рисков для безопасного развития техносферы в государствах СНГ / Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный, Л.Д. Зацаринная // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2011. — № 4. — С. 3—14.
9. Bertsche, V. Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. VDI-Buch, doi: 10.1007/978-3-540-34282-3_2. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
10. Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. — Минск: Навука і тэхніка, 1995. — 256 с.
11. Algin, V. Approaches and Techniques for Calculating Real Reliability of Machine as a System of Different Dependent Components and Complicated Logic of Limiting States / Vladimir Algin // Proc. of 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico, 19—25 June, 2011. — 6 p.
12. Альгин, В.Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 1(14). — С. 10—20.
13. РТМ 70.0001.246-84. Критерии предельного состояния тракторов и их составных частей. — М., 1985.
14. 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.
15. Algin, V.B. Reliability and Lifetime of Mechanical Units in Operation and Test / V.V. Algin, H.-E. Kim // Key Engineering Materials. — 2006. — Vol. 326—328. — Pp. 549—552. — Trans Tech Publications, Switzerland. — Mode of access: <http://www.scientific.net/KEM.326-328.549>.
16. Альгин, В.Б. Расчет реальной надежности машин. Методики, программные средства, примеры / В.Б. Альгин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 2(15). — С. 11—17.
17. Расчет надежности объекта со сложной логикой предельных состояний составных частей в варьируемой эксплуата-

- тационной среде: комп. программа: св-во 145 Респ. Беларусь / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий; правообладатель ОИМ НАН Беларуси. — № С20100017; заявл. 23.02.10; опубл. 18.03.10 // Реестр зарегистрир. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуал. собственности. — 2010.
18. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. — Минск: Беларус. навука, 2010. — 109 с.
 19. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники в варьируемой эксплуатационной среде / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2009. — № 1(6). — С. 7—16.
 20. Альгин, В.Б. Динамика трансмиссии автомобиля и трактора / В.Б. Альгин, В.Я. Павловский, С.Н. Поддубко. — Минск: Наука и техника, 1986. — 214 с.
 21. Algin, V.B. Calculation of Lifetime of a Mechanical System Containing Tribo-Fatigue Elements / V.B. Algin // Proceedings of III International Symposium on Tribo-Fatigue. Oct. 22—26, 2000. — Beijing, China. 2000. — Pp.196—199.
 22. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. — М.: Машиностроение, 1975.—488 с.
 23. Лукинский, В.С. Долговечность деталей шасси автомобиля / В.С. Лукинский, Ю.Г. Котиков, Е.И. Зайцев. — Л.: Машиностроение, 1984. — 284 с.
 24. Когаев, В.П. Суммирование усталостных повреждений при вероятностных расчетах долговечности / В.П. Когаев, И.В. Гадолина // Вестн. машиностроения. — 1989. — № 7. — С. 3—7.
 25. Альгин, В.Б. Расход ресурса автомобиля. Ч. 1: Основные понятия / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий // Механика машин, механизмов и материалов. — 2009. — № 2(7). — С. 17—21.
 26. Альгин, В.Б. Расход ресурса автомобиля. Ч. 2: Модели расхода ресурса основных частей / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий, А.В. Коваленко // Механика машин, механизмов и материалов, 2009. — № 3(8). — С. 5—10.
 27. Радкевич, Я.М. Методология оценки качества и управление состоянием горных машин с использованием вибрационных характеристик / Я.М. Радкевич, М.С. Островский, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 10. — С. 8—12.
 28. Samuel, P.D. A planetary gearbox diagnostic technique using constrained adaptive lifting / P.D. Samuel, D.J. Pines // In Proceedings of the DSTO Third International Conference on Health and Usage Monitoring — HUMS2003, Melbourne, Australia, Febr. 2003. — Paper No. 5.9, Included on CD-ROM.
 29. Мобильная система мониторинга состояния // Evolution. — 2009. — № 2. — С. 24—30.
 30. Ишин, Н.Н. Исследование ударного взаимодействия прямозубых зубчатых колес применительно к задачам вибродиагностики. Определение параметров ударного импульса в зубчатом зацеплении прямозубых цилиндрических зубчатых колес / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов / Вест. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2012. — № 1. — С. 58—63.
 31. Ишин, Н.Н. Исследование ударного взаимодействия прямозубых зубчатых колес применительно к задачам вибродиагностики. Спектральный анализ ударных импульсов зубчатой передачи / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов / Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2012. — № 2. — С. 53—59.
 32. Приближенный метод определения параметров ударного импульса виброимпульса зубчатого зацепления. Спектральный анализ ударных импульсов зубчатой передачи / Н.Н. Ишин [и др.] // Наука и техника. — 2012. — № 3. — С. 63—66.
 33. Ишин, Н.Н. Методология и аппаратно-программные средства вибромониторинга расходования ресурсов приводных механизмов машин / Н.Н. Ишин // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. РНТК по итогам и основным научным результатам выполнения ГКПНИ «Техническая диагностика» (2006—2010 гг.), Минск, 2011. — С. 31—36.
 34. Устройство для диагностики зубчатых передач: пат. Респ. Беларусь № 5721 / Н.Н. Ишин, В.И. Адашкевич, А.С. Скороходов, Л.И. Трухнов, П.Г. Карпович // Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы. Официальный бюл. — 2009. — № 6.

Makhutov N.A., Zatsarinny V.V., Algin V.B., Ishin N.N.

Technogenic risk, reliability and diagnostics of technical systems: approaches, models, methods

An interpenetrating character of concepts «reliability», «safety», and «risk» in the general structure of the concepts defining quality of technical system is demonstrated. Problems of categorization and estimation of technogenic risks of objects of the technical regulation, dangerous industrial objects, and critically and strategically important objects are considered. Methods for calculation of real machines reliability, which are based on modelling the failures (limiting states) of machine as a multilevel system and reproduction of its components dependent behaviours, are presented. Classification and models of life calculations, methodology of an estimation of technical state and monitoring vibration for transmission units of mobile machines are resulted. Approaches to solving problems of reliability and safety of technical systems which are considered by experts of Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences and Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus work are described.

Поступила в редакцию 27.08.2012.